

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



Estudio de la Eliminación Electrocinética de Cobre de un Medio Poroso en un Arreglo Triangular de Electrodo.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA:

VIRGILIO RUBIO NIEBLAS

DIRECTOR

DR. MANUEL PÉREZ TELLO

MEXICALI, B.C.

FEBRERO DE 2016

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California, por haberme permitido realizar mis estudios de posgrado. A la dirección de Investigación y Posgrado de la Universidad de Sonora, por facilitar el acceso al equipo de cómputo de alto rendimiento en el cual se realizaron las simulaciones de este trabajo de tesis. Al Dr. Richard A. Jacobs, por proporcionar el código computacional en el cual se basó este estudio, por sus sugerencias para este propósito.

Mi agradecimiento al Dr. Manuel Pérez Tello por su apoyo y dirección durante la realización de este trabajo de tesis. Asimismo, a los miembros del sínodo, Dr. Ronaldo Herrera Urbina, Dr. Roumen Zlatev, Dra. M. Socorro Romero Hernández, Dr. Ricardo Gallegos Ortega y Dr. Jaime Alonso Reyes López.

Al M. I. José Alfredo Espinoza M., a la Q. B. María Elena Ochoa L, al Q. Oscar A. Sánchez M., al Fis. Horacio Munguía A., al Ing. Rigoberto Franco por su apoyo y asesoría en la realización de este trabajo de investigación. Además, al M. C. Gilberto García Navarrete por sus consejos y recomendaciones.

Dedico este trabajo de tesis

A Dios, por permitirme realizar uno de los anhelos más importantes de mi vida.

A mis hijos, Gerardo Abraham, Bruno David y Pablo Isaac. A Laura Elena⁺, quien fuera mi esposa por más de veinte años. A mis padres Belia y Juan José⁺.

A María Esperanza, por brindarme su apoyo y amor.

Contenido

Resumen	i
Índice de tablas	iii
Índice de figuras	iv
Nomenclatura del modelo matemático	vii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivo general	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
Capítulo 2. Marco teórico	5
2.1 Suelos contaminados	5
2.2 Métodos de limpieza de suelos contaminados	5
2.3 Estudios experimentales del proceso de eliminación electrocinética	7
2.4 Modelación matemática	8
2.4.1 Mecanismos de transporte	11
2.4.1.1 Electromigración	11
2.4.1.2 Electroósmosis	12
2.4.1.3 Difusión	12
2.4.2 Electrólisis del agua	13
2.4.3 Reacciones de electrodeposición de metales.	13
2.4.4 Retención de contaminantes, acomplejación acuosa, y reacciones ácido base	14
2.4.5 Gradientes de presión	14
Capítulo 3. Metodología	18
3.1 Construcción de la celda experimental	19
3.2 Caracterización del medio poroso.	23
3.2.1 Porosidad de la sílica gel.	24
3.2.2 Determinación de la Porosidad de la sílica gel	26
3.2.3 Conductividad hidráulica	27
3.2.4 Conductividad eléctrica.	30
3.2.5 Determinación del Potencial Z.	31
3.3 Experimentos Electrocinéticos.	33
3.4 Modelo computacional.	37
3.5 Estrategia General de Cálculo del Modelo Matemático.	42
Capítulo 4. Resultados y discusión	46
4.1 Resultados de los experimentos	46
4.2 Resultados del Modelo Matemático.	69

4.2.1 Análisis de malla.	72
4.2.2 Validación del modelo matemático.	75
4.2.2.1 Perfiles de voltaje, pH y concentración de cobre.	76
4.2.2.2 Comparaciones a lo largo de las líneas ánodo-cátodo y ánodo-pared... ..	81
4.2.2.3 Errores entre resultados del modelo matemático y datos experimentales.	88
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	94
Referencias bibliográficas	97
APÉNDICE A:	101
APÉNDICE B:.....	103
APÉNDICE C:.....	184

Resumen

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar teórica y experimentalmente los fenómenos que ocurren durante el proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso bidimensional compuesto de partículas de sílica gel. La parte experimental incluyó el diseño y construcción de una celda triangular de acrílico transparente de 59 cm de lado y 7 cm de profundidad. Las variables de estudio en los experimentos incluyeron la concentración inicial de cobre en el medio poroso, 100 y 300 mg/L y la diferencia de potencial eléctrico, 20 a 50 V aplicado entre un ánodo y dos cátodos ubicados en las cercanías de los vértices de la celda triangular. Las variables de respuesta incluyeron la evolución con el tiempo de las distribuciones de voltaje, pH y concentración de cobre total en solución. La parte teórica consistió en la adaptación de un modelo computacional del proceso de eliminación electrocinética reportado en la literatura. El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad por especie, densidad de carga eléctrica total, potencial electrostático y distribución de presión en el suelo. Se consideran los mecanismos de electroósmosis, electromigración y difusión ordinaria de especies, se supone equilibrio químico local, régimen no estacionario y medio poroso isotrópico. La especiación química se representó mediante un sistema de ocho reacciones químicas homogéneas. Las ecuaciones del modelo fueron resueltas con un algoritmo numérico de elemento finito.

En general, los datos experimentales mostraron simetría espacial de los contornos de voltaje, pH y concentración de cobre en el medio poroso a lo largo del tiempo. La evolución de dichas variables de respuesta puede ser explicada en función del avance de un frente ácido y un frente básico hacia los cátodos y el ánodo, respectivamente. El eventual encuentro de ambos frentes produjo la precipitación de hidróxido cúprico en la cercanía de los cátodos. La conductividad eléctrica de la solución se incrementó al aumentar el potencial eléctrico aplicado entre los electrodos activos y la concentración inicial de cobre en el medio poroso. El efecto del potencial eléctrico fue disminuir el valor del pH hasta 2 en el ánodo y aumentarlo hasta 12 en las cercanías de los cátodos. El área máxima producida en la cual la concentración de cobre fue menor a 50 mg/L se alcanzó para el caso de 300 mg/L de concentración inicial de cobre y 50 V de diferencia de potencial. Dicha área se ubicó en la cercanía de los cátodos y es equivalente al 7% del área total del medio poroso. Las predicciones del modelo matemático mostraron en

general concordancia con la tendencia observada en los datos experimentales. La evaluación preliminar del modelo para el caso de 100 mg/L de cobre inicial, 20 V y 96 h de procesamiento indicó errores promedio que oscilaron entre 19-33%, 32-52% y 48-71% para voltaje, pH y concentración de cobre, respectivamente. Las discrepancias entre las predicciones del modelo y los datos experimentales se atribuyen principalmente a la sobreestimación del término de transporte por electromigración y a la necesidad de incluir las reacciones ácido-base del medio poroso.

Índice de tablas

Tabla 1. Modelos computacionales desarrollados para el proceso de eliminación electrocinética de contaminantes en suelos.	17
Tabla 2. Resumen de las pruebas de determinación de conductividad hidráulicas para sílica gel ...	29
Tabla 3. Propiedades físicas de la sílica gel determinadas experimentalmente	33
Tabla 4. Diseño Experimental para los Experimentos Electrocinéticos.	37
Tabla 5. Distribución de las especies químicas y cantidades conservadas.....	42
Tabla 6. Reacciones químicas y constantes de equilibrio calculadas con el software HSC (56)	42
Tabla 7. Parámetros del modelo matemático para la simulación del arreglo experimental.	71
Tabla 8. Comparación de las áreas limpias predichas por el modelo matemático y las obtenidas experimentalmente.....	93

Índice de figuras

Figura 1. Flujo electroosmótico en un medio poroso cargado eléctricamente (12).	9
Figura 2. Metodología desarrollada para el estudio teórico experimental del proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso en dos dimensiones.	18
Figura 3. Vista superior y lateral de la celda experimental para el desarrollo de los experimentos electrocinéticos en dos dimensiones.	20
Figura 4. Detalle de los pozos de electrodos en la celda experimental.	21
Figura 5. Tapa de acrílico para el empacado del medio poroso en la celda experimental.....	21
Figura 6. Tapa de acrílico utilizada para irrigar el medio poroso con la solución de sulfato de cobre ...	22
Figura 7. Tapa de acrílico con orificios para recolección de muestras acuosas e inserción de electrodos pasivos para medición de potencial eléctrico.	22
Figura 8. Vista macroscópica de la sílica gel.	23
Figura 9. Micrografía de microscopía electrónica de barrido de la superficie de una partícula de sílica gel.....	24
Figura 10. Diagrama de un medio poroso representado como un sistema de tres fases.	25
Figura 11. Permeámetro de carga constante utilizado en este estudio para determinar la permeabilidad hidráulica del medio poroso (referencia).	28
Figura 12. Celda experimental para la medición de la conductividad eléctrica de la sílica gel.	31
Figura 13. Sistema experimental para la medición de la conductividad eléctrica de la sílica gel.	31
Figura 14. Equipo de medición de potencial zeta utilizado con una muestra de sílica gel.....	33
Figura 15. Celda experimental y mesa compactadora, 20 golpes por minuto.....	34
Figura 16 Vista del sistema experimental.....	35
Figura 17. Recolección de muestras de solución acuosa en la celda experimental.	36
Figura 18. Cuarteador utilizado para homogenizar las muestras de sílica gel.	37
Figura 19. Distribución de las especies químicas en solución acuosa a 25°C. Concentración total de cobre, 1×10^{-4} mol/L. Adaptado por Fuerstenau y Palmer (52).	41
Figura 20. Estrategia general de cálculo del modelo matemático.....	45
Figura 21. Voltaje aplicado entre electrodos 20 V, concentración inicial de Cu 100 mg/L, tiempo 0, 48 y 96 horas.....	49
Figura 22. Evolución del pH en base a una concentración inicial de Cu de 100 mg/L y un voltaje aplicado de 20 V entre el ánodo y los dos cátodos, y tiempos de 0, 48 y 96 horas.	51
Figura 23. Contornos de Cu en el medio poroso en base a una concentración inicial de 100 mg/L, un voltaje aplicado entre electrodos de 20 V y tiempos de 0, 48 y 96 horas.	54
Figura 24. Voltaje aplicado entre electrodos 50 V, concentración inicial de Cu 100 mg/L, tiempo 0, 48 y 96 horas.....	56
Figura 25. Contornos de pH en base a una concentración inicial de Cu de 100 mg/L, potencial aplicado entre electrodos de 50 V a tiempos de 0, 48 y 96 horas.	58
Figura 26. Contornos de Cu en el medio poroso en base a una concentración inicial de 100 mg/L, un voltaje aplicado entre electrodos de 50 V y tiempos de 0, 48, y 96 horas	60
Figura 27. Contornos de Voltaje en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.....	63

Figura 28. Contornos de pH en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.....	65
Figura 29. Contornos de Cu adimensional y normalizada en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.	67
Figura 30. Porcentaje de área limpia en base a la concentración inicial de Cu en solución de 100 y 300 mg/L y voltaje aplicado entre electrodos de 20 y 50V, a un tiempo de 96 horas.....	69
Figura 31. Resultados del modelo matemático para cinco mallas computacionales. Las condiciones experimentales: 20 V., Concentración inicial de cobre total 100 mg/L, y tiempo total de simulación 96 horas.	73
Figura 32. Rectas secantes obtenidas a partir de las variaciones promedio de los resultados de las cinco mallas computacionales.	74
Figura 33. Malla computacional de 3690 nodos utilizada en la evaluación global del proceso de eliminación electrocinética de cobre en dos dimensiones.	75
Figura 34. Esquema que representa las líneas de extracción de resultados y datos experimentales para su comparación.	76
Figura 35. Comparación de los contornos de voltaje entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.....	77
Figura 36. Comparación de los contornos de pH entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.....	78
Figura 37. Comparación de los contornos de Cu total en solución entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V al término de 96 horas.	79
Figura 38. Comparación de los contornos de voltaje entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.	80
Figura 39. Comparación de los contornos de pH entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.	81
Figura 40. Comparación de los contornos de Cu total en la solución entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.....	82
Figura 41. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de la línea ánodo-cátodo, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.	83
Figura 42. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.	84
Figura 43. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.	85
Figura 44. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.....	86

Figura 45. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.	87
Figura 46. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.	88
Figura 47. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo del voltaje. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V.	90
Figura 48. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo de pH. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V.	91
Figura 49. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo de Cu. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V	92

Nomenclatura del modelo matemático

Variable	Unidades	Descripción
A	ampere	Intensidad de corriente eléctrica
A_w	m^2	Área de electrodo
C_i	$mol \cdot L^{-1}$	Concentración de la especie i
D_i	$m^2 \cdot s^{-1}$	Coefficiente de difusión de la especie i
e	1	Electrón donado o aceptado en una reacción química
F	$C \cdot mol^{-1}$	Constante de Faraday
j_i^d	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Flux molar de la especie i debido a la difusión
J_i	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Flux molar neto de la especie i
j_i	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Flux molar de la especie i por unidad de área intersticial
k_h	m^2	Permeabilidad hidráulica del medio poroso
k_e	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	Coefficiente de permeabilidad electrosmótica efectiva
k_{ei}	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	Coefficiente de movilidad efectiva
k'_h	$m^3 \cdot s \cdot kg^{-1}$	Coefficiente de permeabilidad efectiva del medio
K_j	Variable	Constante de equilibrio de la j -ésima reacción química
M	1	Número de elementos químicos en el sistema
N	1	Número total de especies químicas
P	Pa	Presión
R_i	$mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	Rapidez volumétrica neta de producción de la especie i por reacción química homogénea
R_i^a	$mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	Velocidad volumétrica neta de producción de la especie i por adsorción
t	s	Tiempo
u_c	$m \cdot s^{-1}$	Velocidad de convección del líquido masivo
u_{ei}	$m \cdot s^{-1}$	Velocidad de electromigración
u_{eo}	$m \cdot s^{-1}$	Velocidad intersticial debido a la electroósmosis.
u_h	$m \cdot s^{-1}$	Velocidad intersticial
z_i	1	Número de valencia de la especie química i

Subíndices

i	Especie
h	Gradiente de presión
e	Electroósmosis
c	Líquido contenido en el medio poroso
ei	Electromigración
eo	Electroósmosis
w	Electrodo

Superíndices

a	Fase adsorbida
---	----------------

+	Carga eléctrica positiva
-	Carga eléctrica negativa

Símbolos Griegos

$\alpha_{i,k}$	1	Contribución de cada especie i a la cantidad conservada k
ε	F•m ⁻¹	Permitividad del líquido
ζ	V	Potencial Z
τ	1	Tortuosidad
μ	Pa•s	Viscosidad del líquido en el poro
ν_i	1	Coefficiente estequiométrico de la especie i en la j -ésima reacción química
Φ	V	Potencial electrostático
v_i	F•mol ⁻¹	Movilidad
ψ	1	Porosidad del suelo
σ_s	$\Omega^{-1}\cdot\text{m}$	Conductividad aparente del suelo
σ	C	Carga eléctrica del medio
$(\gamma_{io})_w$	1	Número de moles de la especie i producida por mol de electrones capturados o liberados en las reacciones electroquímicas

Símbolos Especiales

∇	m ⁻¹	Operador nabra; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$
----------	-----------------	--

Capítulo 1. Introducción

La contaminación de suelos se ha convertido en un problema a nivel mundial al que se le ha dado mucha importancia en el ámbito académico, industrial, social y legislativo. Por tal razón, se realizan esfuerzos significativos para tratar de solucionar dicho problema.

Con el fin de prevenir efectos nocivos a la salud humana o al medio ambiente, se han propuesto varios métodos de restauración de suelos tales como: inmovilización, degradación, atenuación, reducción de volatilización, y extracción (1). Una modificación de esta última categoría es el proceso de eliminación electrocinética.

La eliminación electrocinética ha recibido una atención considerable debido a su potencial para reducir los contaminantes a niveles seguros y a un bajo costo (2).

A este proceso se le ha llamado con muchos nombres, los más comúnmente usados son: electrorestauración (3), electroremediación (4), electroreclamación (5) y eliminación electrocinética entre otros. Esta técnica está relacionada principalmente con los fenómenos de electroósmosis y electromigración para mover los contaminantes contenidos en el líquido del poro hacia los puntos predeterminados donde se encuentran insertados los electrodos, donde se pueden colectar (6).

El proceso de eliminación electrocinética consiste en inundar primeramente con agua el suelo contaminado con el fin de promover la formación de iones del material contaminante en la solución acuosa dentro de los poros. Posteriormente se insertan electrodos en el suelo y al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre ellos, el campo eléctrico causa que los iones en solución migren hacia los electrodos de signo opuesto, de este modo, se promueve la eliminación del material contaminante. Este proceso puede ser utilizado *in situ* y no se ve afectado por el tamaño del poro del suelo; por lo tanto, una de sus ventajas es que se puede utilizar en suelos de granos muy finos (7) y de baja permeabilidad hidráulica (8). Se requieren bajos niveles de corriente directa, del orden de mA por cm² de área de electrodo (9). Con este método se pueden eliminar o separar contaminantes inorgánicos, orgánicos y radioactivos (10).

La eliminación electrocinética es una tecnología en desarrollo. El cobre es uno de los metales que puede ser eliminado con este proceso, que usado *in situ* puede ser útil para

concentrar iones altamente solubles, tales como: SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- ; que son difíciles de eliminar por métodos tradicionales como el bombeo (11).

Avances significativos se han logrado en la elucidación de los mecanismos que intervienen en el proceso de eliminación electrocinética como resultado de trabajos experimentales (10) y modelación matemática (12) para una variedad de contaminantes bajo condiciones controladas de laboratorio. Sin embargo, la mayoría de la literatura aborda sistemas unidimensionales (13) en los cuales, el movimiento de los contaminantes ocurre en una sola dirección dentro de un tubo, en cuyos extremos se colocan los electrodos. En 1996 Jacobs y Probst (2) informaron sobre el primer modelo matemático bidimensional para el proceso de eliminación electrocinética. El modelo se verificó mediante la comparación de sus predicciones con los valores experimentales obtenidos durante la remoción de fenol un lecho de partículas de caolín en condiciones de laboratorio. Las aplicaciones potenciales del modelo fueron analizadas por Jacobs (14) que realizó un estudio computacional para dilucidar las principales características del proceso bajo una variedad de configuraciones geométricas de electrodos en un campo bidimensional. Jacobs encontró que en arreglos de electrodos en los que los ánodos están rodeados por un número mayor de cátodos proporcionan mayores eficiencias que aquellos en los que los cátodos están rodeados de los ánodos. Para contaminantes que forman cationes en solución, los arreglos de electrodos más eficientes son los que proporcionan un flujo radial del ánodo central a los cátodos circundantes (14).

Durante la revisión de literatura, no se encontraron estudios experimentales o teóricos considerando aspectos bidimensionales del proceso de eliminación electrocinética de contaminantes en suelos desde la última obra de Jacobs (2).

En virtud de lo anterior, surge el interés para comprender su comportamiento desde un punto de vista fundamental, y por consiguiente, su futura optimización. Esto se puede lograr mediante trabajo experimental y el desarrollo de modelos matemáticos fundamentales que describan el proceso.

Este trabajo de investigación fue motivado por recientes informes (15) relativos a la contaminación del suelo con cobre en las vecindades de la ciudad de Cananea, Sonora, México, como resultado de la actividad minera intensa realizada en esta área durante los últimos cien años. Basado en los niveles de concentración de cobre y otros metales

pesados encontrados en las muestras de suelo de esa región (16), fue de interés investigar la potencial aplicación del proceso de eliminación electrocinética como candidato para el tratamiento de tales sitios contaminados.

La contribución de este trabajo se enfoca principalmente en el desarrollo de una metodología para el estudio teórico experimental del proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso bidimensional como parte complementaria de la investigación en este campo. Además, el modelo computacional usado, evalúa cuantitativamente las relaciones de causa - efecto entre las variables involucradas en el proceso; asimismo, puede ser utilizado para establecer criterios de optimización en su operación comercial.

Finalmente, el problema fundamental que se plantea resolver en este estudio, es entender los fenómenos que se presentan durante el proceso de eliminación electrocinética en términos de principios fundamentales.

1.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue caracterizar teórica y experimentalmente los fenómenos que ocurren durante el proceso de eliminación electrocinética de cobre en un medio poroso bidimensional.

1.1.1 Objetivos específicos

A fin de lograr el objetivo general de este trabajo, se plantearon los siguientes objetivos específicos.

- Diseño y construcción de una celda experimental bidimensional triangular para realizar experimentos de eliminación electrocinética.
- Realizar experimentación en la celda triangular para diferentes condiciones de operación y obtener los contornos de concentración de Cu y pH en el medio poroso como función del tiempo.
- Cuantificar experimentalmente los efectos de la configuración de electrodos, la concentración inicial de cobre, y el voltaje aplicado entre electrodos sobre las variables de respuesta: distribución de voltaje, pH y concentración de Cu total en solución.

- Evaluación del modelo matemático adaptado previamente por Rubio V. et al. (1) mediante comparación de sus predicciones con los datos experimentales.
- Evaluación global del efecto de las variables de estudio sobre las variables de respuesta en base al estudio experimental y el modelo matemático.

Capítulo 2. Marco teórico

Se realizó una revisión bibliográfica de las últimas 3 décadas sobre los siguientes puntos: (a) suelos contaminados, (b) métodos de limpieza de suelos contaminados, (c) Estudios experimentales de la eliminación electrocinética de contaminantes en suelos, y (d) modelación matemática de la eliminación electrocinética de contaminantes en suelos. A continuación se presenta la revisión de cada aspecto.

2.1 Suelos contaminados

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), en ese país existe una región seriamente contaminada con plomo y zinc, es la de Cherokee en el estado de Kansas (17). En el estado de Sonora, México, las regiones contaminadas con cobre se encuentran localizadas al sur de la ciudad de Cananea (15)

Los suelos contaminados por algunas plantas metalúrgicas ocupan grandes volúmenes. Además de sus implicaciones ecológicas, esto origina una pérdida en el valor del suelo, el cual ya no puede ser reutilizado productivamente. En ciertos casos, la contaminación ocurre en lugares altamente poblados y en áreas industrializadas. Por este motivo, existe la necesidad de métodos de limpieza con el fin de descontaminar dichos lugares.

El costo de la limpieza de suelos contaminados actualmente oscila entre 50 y 1,500 dólares por metro cúbico de suelo, dependiendo del grado de contaminación, tipo de contaminante, y proceso de tratamiento (10). En general, se han reportado cinco tipos de tratamiento para suelos contaminados: inmovilización, degradación, atenuación, reducción de volatilización, y extracción (1). Una modificación de esta última categoría es el proceso de eliminación electrocinética.

2.2 Métodos de limpieza de suelos contaminados

Inmovilización. La inmovilización involucra un amplio número de tecnologías de tratamiento para reducir la velocidad de transporte de los contaminantes del suelo, de manera que las concentraciones resultantes en el suelo expuestas se mantienen dentro de límites aceptables. Los mecanismos de inmovilización primaria son la adsorción,

intercambio iónico y precipitación. La adsorción es potencialmente aplicable a contaminantes orgánicos e inorgánicos. El intercambio iónico es aplicable a especies orgánicas aniónicas y catiónicas. La precipitación es limitada para la mayoría de los propósitos prácticos, es decir, para los contaminantes como los metales pesados. Degradación, Es la acción de transformar los contaminantes del suelo en compuestos menos tóxicos o menos móviles. Dicha transformación puede llevarse a cabo mediante reacciones de oxidación y reducción con reactivos químicos, uso de bacterias (biodegradación) y por efecto de la luz solar (fotólisis).

Reducción de la volatilización. Si los contaminantes del suelo son volátiles, y si se encuentran expuestos a la atmósfera, entonces es importante suprimir la volatilidad de dichos contaminantes. Esto puede tener el beneficio adicional de retener los componentes dentro del suelo, por un largo tiempo, para permitir un tratamiento por uno de los métodos descritos anteriormente.

El mejor método para reducir la volatilización de contaminantes del suelo, es disminuir el vapor contenido en el poro, a través del cual se transportan dichos contaminantes. Esto puede lograrse mediante la compactación o adición de agua para reducir el espacio de aire en el poro. Otra técnica es disminuir la temperatura del suelo, con el fin de que la presión de vapor de los contaminantes disminuya.

Extracción (Lavado de suelos). La extracción consiste en lavar los contaminantes del suelo con solventes como agua, u otras soluciones no acuosas. El método es potencialmente aplicable a todos los tipos de contaminantes de suelos, siempre y cuando se encuentre un solvente adecuado. Deben de estudiarse los efectos de dichos solventes en las propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, se necesita diseñar un sistema para inundar el área contaminada con el solvente y capturar el efluente. Después del tratamiento, el efluente debe ser descargado a un cárcamo, o puede reciclarse a través del área contaminada. Esta tecnología se usa en la industria minera para recuperar valores metálicos de los minerales.

Una técnica de extracción reciente y que tiene algunas ventajas sobre los métodos antes mencionados, es la eliminación electrocinética, la cual es de interés en este proyecto. Esta consiste en insertar electrodos en el suelo y aplicar un potencial eléctrico a través de los electrodos. El campo eléctrico causa que los iones metálicos migren al cátodo. De esta

manera se acelera el proceso de descontaminación. Se ha encontrado que este proceso no se ve afectado por el tamaño del poro del suelo; por lo tanto, una de sus ventajas es que se puede utilizar en suelos de granos muy finos (7), se requieren bajos niveles de corriente directa (del orden de mA) por cm^2 de área de electrodo (18). Con este método se pueden eliminar o separar contaminantes inorgánicos, orgánicos y radioactivos (10). La eliminación electrocinética es una tecnología en desarrollo. El cobre es uno de los metales susceptible a ser eliminado por medio de esta tecnología, además la electromigración *in situ* puede ser un método útil para concentrar iones altamente solubles, tales como: SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- ; que son difíciles de eliminar por métodos tradicionales como el bombeo (11).

2.3 Estudios experimentales del proceso de eliminación electrocinética

Un número importante de los trabajos reportados sobre el proceso de eliminación electrocinética se realizaron a nivel de laboratorio (8) con materiales porosos sintéticos. El más comúnmente utilizado es caolín, pero también se han utilizado otros tipos de medios como: arena, mezclas artificiales de arcillas, y suelos naturales. Una fuente de poder para generar gradientes de voltaje constante en un intervalo de 20 a 200 Vm^{-1} (19) frecuentemente es utilizada para hacer pasar una corriente eléctrica directa a través del suelo. Alternativamente la densidad de corriente puede ser baja (20, 21), mantenida a un valor constante en un intervalo de 0.025 a 5 A m^{-2} (18).

La duración de los experimentos reportados varía, desde pocas horas hasta meses. Por otra parte, la humedad en el suelo, conductividad y pH de la solución del poro y distribución del contaminante a través del suelo, son generalmente medidos al final de cada experimento. La corriente, el voltaje, el flujo del líquido y la composición química del efluente pueden ser continuamente monitoreados. Cambios en la composición del suelo a través del proceso de eliminación pueden ser detectados de varias maneras: 1) conductividad del suelo (10). 2) se pueden seguir los cambios en los valores de pH en el suelo mediante medición directa o mediante la adición de indicadores de pH (22). También es posible medir el pH mediante el uso de radio trazadores (23) .

Los metales están presentes en forma de cationes y por lo tanto son transportados hacia el cátodo principalmente por electromigración. Sin embargo, ciertos elementos como As y Cr pueden estar presentes como hidroxianiones, en consecuencia se mueven hacia el

ánodo (24). El proceso de eliminación electrocinética también puede utilizarse para remover otros aniones tales como sulfatos (11) y cianuro (25) realizaron experimentos para eliminar As, Cd, Co, Cr, Sc, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, y Zn de arcillas, suelos con contenido orgánico, arcillas y arena, se alcanzaron niveles de eliminación del 76% (25). Por otra parte, Pamukcu SaW, J. K (26, 27) realizaron estudios experimentales con As, Cd, Co, Cr, Cs, Hg, Ni, Pb, Sr, U y Zn, en caolín, bentonita y en una mezcla de bentonita y arena. Los autores reportaron eliminaciones del 85 al 95% para Cd, Co, Ni y Sr.

Para sustancias moleculares, la electroósmosis es el mecanismo de transporte predominante bajo los efectos de un campo eléctrico. Para algunas moléculas orgánicas parcialmente disociadas en iones, la electromigración es el mecanismo predominante. Trabajos realizados por Lageman R, Pool (28), mostraron que una buena cantidad de compuestos orgánicos aromáticos puede ser eliminados. En el laboratorio se demostró que a partir de muestras de suelo se puede eliminar ácido acético y fenol (2, 12, 19), gasolina y tricloroetano (29, 30) y hexaclorobenceno (27, 31). La eliminación electrocinética es menos efectiva para compuestos orgánicos no polares inmiscibles, aunque pueden ser movidos por electroósmosis si se encuentran como pequeñas gotas (32). Coloides (33) y bacterias (34) pueden ser transportados por una combinación de electroósmosis y electroforesis si el suelo tiene un tamaño de grano lo suficientemente grande.

2.4 Modelación matemática

Los primeros modelos desarrollados para el proceso de eliminación electrocinética fueron basados en la suposición de que el medio poroso puede representarse por un haz de cilindros capilares, de tal manera que el flujo de especies pueda modelarse dentro de estos cilindros. Los primeros en desarrollar este tipo de modelos fueron: Jacobs R. A. (2), Choi, Y. S. y Luis R. (7), Hamed J. y Acar Y.B. (10), Shapiro A. P. y Renaul P. C. (12), Shapiro A. P. y Probstein R. F. (19), Yeh G. T. Y Tripathi V. S. (35), Probstein R. R. y Renaul P. C. (36).

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático en el cual aparece la dirección del campo eléctrico aplicado, el gradiente hidráulico, y el flujo de iones durante el proceso de eliminación electrocinética. Asimismo se indica que los iones positivos migran hacia el cátodo (-), y los iones negativos al ánodo (+).

Shapiro A. P y Renaul P. C. (12) desarrollaron el primer modelo matemático del proceso de eliminación electrocinética basado en el modelo de capilaridad para medios porosos. El modelo predice el comportamiento en régimen no estacionario de la concentración de las especies en solución. Se considera transporte por electromigración, electroósmosis, convección y difusión en el medio poroso en presencia de un campo eléctrico aplicado.

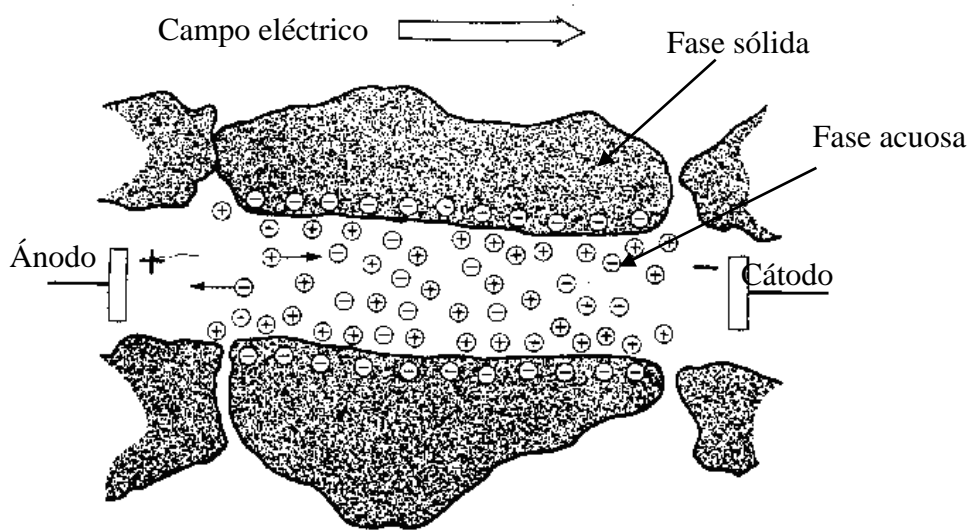


Figura 1. Flujo electroosmótico en un medio poroso cargado eléctricamente (12).

El modelo también incluye las reacciones de equilibrio químico de especies, y las reacciones electroquímicas heterogéneas en los electrodos. Partiendo de la ecuación de continuidad de cada especie en solución, los autores obtuvieron el siguiente modelo matemático:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D_i}{\tau^2} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} c_i [(u_{ei} - u_c)] + R_i \quad (2.1)$$

donde C_i es la concentración de la especie i , D_i es el coeficiente de difusión de la especie i , τ es la tortuosidad del medio poroso, z es la dirección en la cual se da el transporte electrocinético de especies, u_{ei} es la velocidad efectiva debido a la electromigración, u_c es la velocidad de convección, y R_i es la velocidad de producción molar de la especie i por reacción química homogénea. En base a sus resultados, los autores sugirieron que el

proceso de eliminación electrocinética puede extraer eficientemente ácido acético de un medio poroso saturado, en este caso caolín. La comparación de los resultados computacionales con los datos experimentales mostró una buena concordancia. Lo anterior sugiere que los fenómenos de convección, electromigración, difusión, las reacciones de electrodo y reacciones de equilibrio químico, las cuales se incluyeron en el modelo, representaron razonablemente el proceso global. Sin embargo, para casos en los que las concentraciones de ácido acético eran bajas, la predicción del modelo no fue satisfactoria. Una causa posible de lo anterior es que el modelo no tomó en cuenta la adsorción de especies químicas en la superficie del poro. En base a los resultados de su estudio, los autores concluyeron que el transporte dominante de las especies fue el de electromigración.

El modelo de Shapiro A. P y Renaul P. C. (12) fue modificado por Jacobs R. A et al. (37) para incorporar reacciones de complejación, precipitación y adsorción. Con el nuevo modelo se obtuvo una predicción razonable de los datos experimentales para la eliminación de zinc de suelos con exceso de iones sodio. Se demostró el papel que juegan los iones característicos del medio y la electroneutralidad en la distribución que gobierna las especies y cómo las variaciones asociadas al campo eléctrico resultan en una suspensión virtual del proceso de transporte. El modelo confirmó que pueden alcanzarse altas eficiencias de eliminación de metales, simplemente si se incorpora al proceso, el lavado del cátodo.

Jacobs y Probstein (2) desarrollaron un modelo matemático en dos dimensiones para el movimiento de iones en un medio poroso. El modelo describe la relación entre el transporte de masa, carga, y el sistema de especies químicas sometidas a un campo eléctrico. Los mecanismos de transporte involucrados son: electroósmosis, convección debida a una diferencia de presión, electromigración y difusión. Se supuso equilibrio químico y de adsorción. El modelo se usó para simular la eliminación de fenol de arcillas de caolín. A continuación se presenta el modelo matemático desarrollado por los autores:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(F \sum_{i=1}^N z_i (C_i + C_i^a) \right) + \nabla \cdot i = F \sum_{i=1}^N z_i R_i = 0 \quad (2.2)$$

Donde: t es el tiempo, C_i^a es la concentración de la especie i en la fase adsorbida, referida al volumen del líquido, C_i es la concentración de la especie i en el líquido del poro, z es el número de valencia de la especie i , F es la constante de Faraday, R_i es la rapidez de generación de la especie i debido a reacciones químicas o adsorción, respectivamente.

La comparación de las predicciones del modelo con los datos experimentales para el sistema agua-fenol, mostró una concordancia razonable. La información obtenida de las simulaciones numéricas ilustró la utilidad del modelo para avanzar en el entendimiento del comportamiento complejo de los procesos electrocinéticos durante la eliminación de contaminantes en suelos (38), además de la posibilidad de optimizarlos manipulando algunas variables como el arreglo de electrodos (39).

2.4.1 Mecanismos de transporte

Los fenómenos que ocurren durante el proceso de eliminación electrocinética se pueden clasificar como sigue: aquellos que ocurren debido a la influencia del campo eléctrico y los que no. Como ejemplo de los primeros se pueden mencionar: la electromigración, electroósmosis y electroforesis, electrólisis del agua y reacciones de deelectrodeposición de los metales. Aquellos que no ocurren por la influencia del campo eléctrico son: adsorción, reacciones de acomplejación y precipitación, reacciones ácido-base, difusión (40) y efectos por gradiente hidráulico.

2.4.1.1 Electromigración

Cuando una corriente directa es aplicada a un suelo saturado con agua, los cationes (+) disueltos se mueven hacia el cátodo, carga negativamente, y los aniones (-) se mueven hacia el ánodo, cargado positivamente. La movilidad efectiva del ion es una medida de la velocidad con la que se mueven hacia los electrodos de carga opuesta. La velocidad de electromigración, u_{ei} , se calcula en función de la valencia de la especie i , el potencial eléctrico aplicado y la constante de Faraday.

$$u_{ei} = -\nu_i z_i F \frac{\nabla \phi}{\tau^2} \equiv k_{ei} \nabla \phi \quad (2.3)$$

donde la velocidad de migración es relativa al líquido en el poro, U_i es la movilidad, definida como una velocidad resultante de una unidad de fuerza por mol, z_i es la carga de la especie i , F es la constante de Faraday y, k_{ei} es el coeficiente de movilidad efectiva.

2.4.1.2 Electroósmosis

El fenómeno de la electroósmosis primeramente fue observado por F. F. Reus en 1809 y se debe a la fuerza generada por un campo eléctrico aplicado a una delgada capa de líquido cargado que se forma cerca de la pared del poro. Esta capa delgada se conoce como doble capa eléctrica, y es resultado del efecto de la pared cargada eléctricamente del poro sobre la distribución de los iones cercanos a ella: los iones con la misma carga que la pared son repelidos, mientras que los que tienen carga diferente son atraídos hacia ella. De esta manera, se genera una carga neta en el líquido que neutraliza la carga eléctrica superficial de la pared del poro. La fuerza del campo eléctrico aplicado causa que el fluido en la doble capa se mueva, lo que provoca que también el líquido masivo se mueva debido a las fuerzas de viscosidad interactuantes. Por lo tanto, en un medio poroso el efecto de la electroósmosis actúa en la misma dirección que el campo eléctrico.

$$u_{eo} = \frac{\varepsilon \zeta}{\tau^2 \mu} \nabla \phi \equiv k_e \nabla \phi \quad (2.4)$$

donde: u_{eo} es la velocidad intersticial debida a la electroósmosis, ε es la permitividad del líquido, ζ es el potencial zeta del suelo, τ es la tortuosidad, μ es la viscosidad del líquido, ϕ es el potencial electrostático, y k_e es el coeficiente de permeabilidad electroosmótica efectiva.

2.4.1.3 Difusión

Las especies químicas migran desde los lugares donde su concentración es mayor otros donde la concentración es menor. El flujo difusivo en un medio poroso, está representado por la ley de Fick. Dado un valor bajo de pH en el pozo del ánodo, y un valor alto de pH en el pozo del cátodo, la difusión puede ser un mecanismo importante para el transporte de iones H^+ y OH^- desde el pozo de los electrodos hacia el suelo.

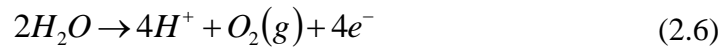
$$\mathbf{j} = -\frac{D_i}{\tau^2} \nabla C_i \quad (2.5)$$

Donde \mathbf{j} es el flux molar neto de la especie i , D_i es el coeficiente de difusividad de la especie i , C_i es la concentración de la especie i en mol/m^3 , y τ es la tortuosidad.

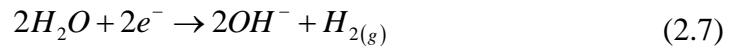
2.4.2 Electrólisis del agua.

El efecto de electrólisis ocurre en los electrodos cuando los electrones son transferidos de un material conductor, como el grafito, hacia el fluido en el poro. Como resultado, H^+ y $\text{O}_{2(g)}$ se producen en el ánodo, así como OH^- y $\text{H}_{2(g)}$ en el cátodo de acuerdo a las reacciones de electrólisis del agua.

Reacción anódica:



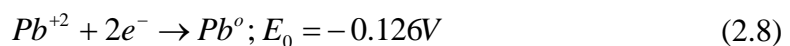
Reacción catódica:



Estas reacciones han sido identificadas como la primera causa de los cambios del sistema químico en el suelo durante el proceso de eliminación electrocinética. Además de estas reacciones en los electrodos, reacciones químicas también ocurren en el seno de la solución durante la electroósmosis. Bajo un gradiente de potencial eléctrico aplicado, los iones H^+ migran hacia el cátodo y los iones OH^- migran hacia el ánodo. De esta manera ocurren cambios en el equilibrio químico y en función del pH del suelo.

2.4.3 Reacciones de electrodeposición de metales.

Los iones metálicos con carga positiva que se mueven hacia el pozo del cátodo pueden aceptar electrones y depositarse en el cátodo. Por ejemplo, la reacción de depositación del plomo:



La electrodeposición de los metales pesados contaminantes puede ser benéfica para el líquido del pozo del electrodo ya que el tratamiento de limpieza puede ser mínimo, por ejemplo, cuando el metal se electrodeposita en el cátodo, éste puede ser retirado y dispuesto para posteriormente, ser despojado del metal (40).

2.4.4 Retención de contaminantes, acomplejación acuosa, y reacciones ácido base

Según Reed B. E. y Berg M. T. (40), los fenómenos de retención por adsorción (intercambio iónico, adsorción química y física), y precipitación en la superficie, en la mayoría de los sólidos hidrofílicos, dependen fuertemente del pH. Para iones metálicos (cationes), la retención se incrementa conforme aumenta el valor de pH. Lo contrario generalmente ocurre para adsorbatos aniónicos. El pH afecta: (1) la carga eléctrica de la especie metálica, lo que permite que el metal resida cerca de la superficie del suelo; (2) las reacciones de hidrolización, acomplejación y precipitación de los metales, y (3) el comportamiento de la superficie del suelo. Para valores de pH por debajo del pH al cual la precipitación en la solución empieza, (pH_{prec}), la adsorción más frecuentemente es el mecanismo de retención dominante. En la medida que el pH de la solución alcanza el valor de pH_{prec} . la precipitación en la superficie del suelo se vuelve más importante.

2.4.5 Gradientes de presión

Si se aplica un gradiente de presión hidráulica en un medio poroso saturado, se induce una velocidad convectiva del líquido contenido en dicho medio.

El gradiente de presión aplicado es aquel que se impone entre electrodos, por ejemplo cuando se usa agua de lavado. El gradiente de presión inducido, es aquél que se alcanza a partir de la variación espacial de la velocidad electroosmótica (6). Por otra parte, los gradientes de presión que se deben a causas naturales, son aquellos que se generan debido a la diferencia de niveles del agua dentro de los poros, a la compactación no uniforme del suelo o a desniveles en él (41).

La relativa contribución de los gradientes de presión al flujo es determinada por la permeabilidad hidráulica del medio. En suelos con alta permeabilidad, es posible que pequeños gradientes de presión incrementen el efecto de la electroósmosis y se convierta en el mecanismo de flujo dominante. Por otra parte es posible que la electroósmosis sea el mecanismo dominante en suelos con baja permeabilidad, debido a la gran diferencia

de potencial electrostático que se forma entre la superficie del poro y la doble capa eléctrica. Lo anterior provoca que la electroósmosis tenga varias ventajas significativas sobre otros tratamientos como bombeo convencional. En términos de dirección de flujo, dos clases de electrodos son definidos: electrodos de lavado y electrodos de drenado.

Los electrodos de lavado son aquellos en los cuales el líquido va del pozo del electrodo hacia el medio poroso. Los electrodos de drenado son aquellos en los cuales llega el líquido del medio poroso para ser extraído. En el proceso de eliminación electrocinética con agua de lavado (36) una solución es introducida por los electrodos de lavado para mantener el medio poroso saturado y promover la eliminación de los contaminantes. Debido a que la velocidad de flujo electroosmótico es proporcional a la carga superficial de las partículas del medio poroso, el líquido de purga que resulta de un suelo cuya carga superficial es alta, es deseable.

A la fecha Rubio V. et al. (42, 43) ha desarrollado trabajos de investigación relacionados con estudios teóricos del proceso de eliminación electrocinética de contaminantes. El primero consistió en la modelación computacional del proceso de eliminación electrocinética de cobre de un suelo natural de la ciudad de Cananea, Sonora. Los objetivos del estudio fueron: (a) representar cuantitativamente los fenómenos que ocurren durante el proceso y (b) realizar un análisis de sensibilidad de variables, a fin de esclarecer los efectos de las principales variables de operación sobre los rendimientos del proceso. Con este propósito se adaptó un modelo computacional reportado en la literatura. Para representar el sistema químico se propuso un sistema de reacciones homogéneas. Las ecuaciones del modelo fueron resueltas utilizando un algoritmo numérico de elemento finito.

La comparación de las predicciones del modelo con datos experimentales reportados en la literatura para una celda a nivel laboratorio mostró concordancia razonable en términos de los perfiles de concentración de cobre total y pH. El análisis de sensibilidad de variables se realizó en un arreglo de electrodos en forma de triángulo equilátero. Las variables de estudio incluyeron: la concentración inicial de cobre en la fase acuosa, el voltaje aplicado entre electrodos, y el uso o no de agua de lavado.

Los resultados de dicho trabajo mostraron el uso potencial del modelo computacional para futuros estudios de análisis y optimización del proceso.

El segundo trabajo se basó en la metodología del primero y su objetivo fue cuantificar el efecto de las variables de operación del proceso de eliminación electrocinética de cobre en arena contaminada, sobre su rendimiento. Para establecer criterios que faciliten la experimentación del proceso en una celda triangular a nivel laboratorio.

En resumen el estado de la literatura muestra que el proceso de eliminación electrocinética es una tecnología novedosa a la que los países desarrollados le han puesto atención. Esta tecnología es efectiva para limpiar lugares donde otros métodos de tratamiento no son eficientes. Los tipos de suelos que se han utilizado en los diferentes estudios son: caolín, arena, bentonita, mezclas de suelos de bentonita y arena, arcillas, y suelos con alto contenido de carbón, producto de la descomposición parcial de las plantas. En general, los resultados reportados son en una dirección, es decir, el movimiento de las especies contaminantes solo ocurre entre dos electrodos, un ánodo y un cátodo. Contaminantes orgánicos, inorgánicos y radioactivos se han estudiado con ésta tecnología. Fenol, ácido acético, y gasolina entre otros. También se han hecho estudios con otros contaminantes como As, Hg, Cu, Mn, Cd, y Pb, etc. Los grados de eliminación de contaminantes reportados van desde el 76 al 95%. Por otra parte, debido a la complejidad que implica la interacción entre los diversos fenómenos que ocurren en este proceso entre los que se pueden mencionar electromigración, electroósmosis, difusión (12), adsorción, precipitación, formación de complejos en la fase acuosa, convección de especies que migran en el medio poroso, se han desarrollado modelos matemáticos para describirlos. Sin embargo la formulación de dichos modelos es limitada, ya que solamente sus predicciones suelen ser en una sola dirección (tabla 1), entre un ánodo y un cátodo (7, 10, 38, 39). A la fecha el modelo de Jacobs y Probst (1996) es el más completo y versátil, ya que considera flujo bidimensional y es susceptible de ser aplicado a otros sistemas de interés. Por tanto su uso como herramienta de análisis para el proceso de eliminación electrocinética en el caso de un suelo de la región de Cananea, Sonora, contaminado con cobre (15), es factible.

Tabla 1. Modelos computacionales desarrollados para el proceso de eliminación electrocinética de contaminantes en suelos.

Año	Autor	Contaminante	Adsorción	Dimensiones
1989	Shapiro	Ac. Acético	No	1D
1991	Hamed	Pb	Si	1D
1994	Probstein	Zn	Si	1D
1995	Choi y Lie	Cd	Si	1D
1996	Jacobs y Probstein	Fenol	Si	2D
2005	Shiba	CuSO ₄	Si	1D

Capítulo 3. Metodología

Para lograr el objetivo anterior, se propuso estudiar el proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso contaminado en base a una metodología teórico-experimental (Figura 2).

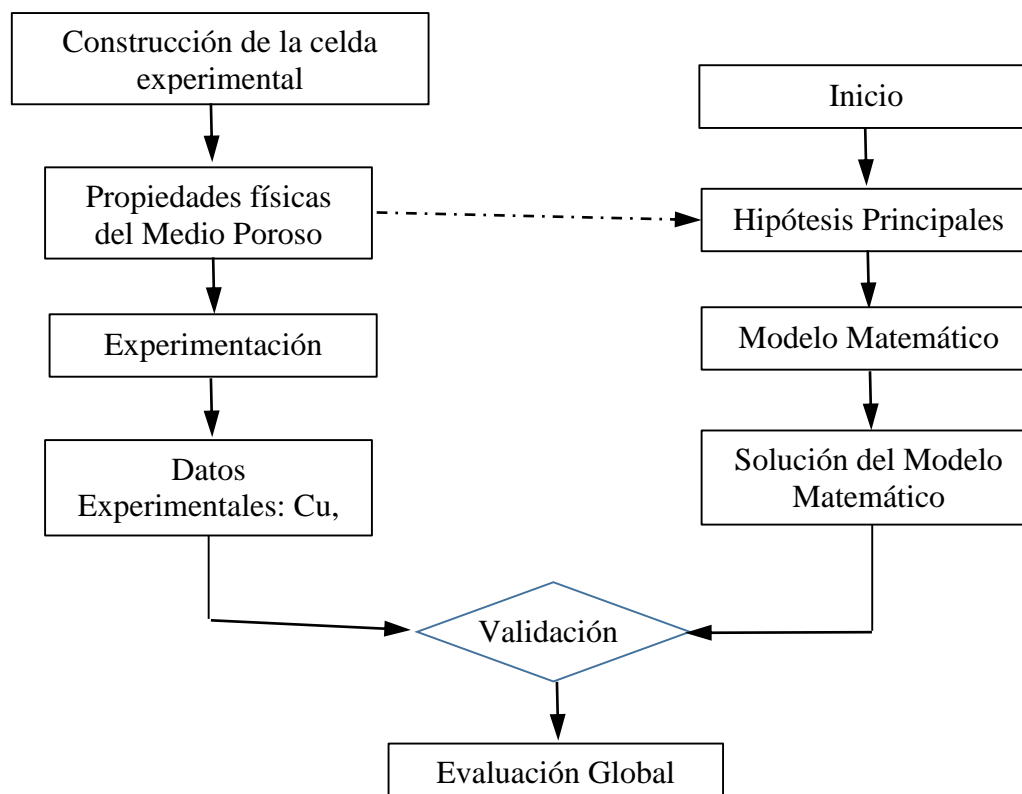


Figura 2. Metodología desarrollada para el estudio teórico experimental del proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso en dos dimensiones.

La parte experimental a su vez, incluyó varias etapas. La primera fue construir la celda donde se realizaron los experimentos. Posteriormente se determinaron las propiedades físicas del medio poroso (sílica gel). Después se saturó el medio poroso con una solución sintética de sulfato de cobre y se realizaron los experimentos de eliminación electrocinética aplicando una diferencia de voltaje entre ánodo y cátodos. Durante los experimentos se midieron la concentración de Cu, pH y diferencia de potencial eléctrico en el medio poroso.

La parte teórica consistió en adaptar el modelo computacional desarrollado por Jacobs y Probstein (2) para representar la eliminación electrocinética de cobre en el medio poroso. Esta etapa incluyó la formulación del sistema químico en el cual se plantean las

ecuaciones de equilibrio de las diferentes especies de cobre en la fase acuosa (44) y la validación del modelo con datos experimentales reportados en la literatura por Moreno (16). Una vez validado el modelo, se utilizó para comparar sus resultados con los datos experimentales obtenidos durante la realización de este trabajo de investigación.

3.1 Construcción de la celda experimental

La figura 3 muestra el esquema de la celda experimental construida en acrílico transparente en forma de triángulo equilátero de 59 cm de longitud; las esquinas son redondeadas en base a un radio de 10 cm, la altura y el espesor de la pared de la celda son 7 y 0.6 cm, respectivamente. A 2 cm del centro de cada circunferencia que le da la redondez a las tres esquinas se localizan los pozos de los electrodos cuyos diámetros internos son de 3.81 cm con una separación entre sus centros de 54 cm. La figura 4 muestra el detalle de los pozos de los electrodos, dentro de los cuales se colocaron electrodos de grafito con un diámetro de 0.95 cm; los electrodos consistieron de un ánodo y dos cátodos.

La distancia más corta entre las paredes externas de los pozos de electrodos es de 50 cm. La celda se construyó con un fondo del mismo material de espesor es 1.9 cm. Las figuras 5, 6 y 7 muestran tres tapas de acrílico las cuales se acoplan a la celda y tienen funciones específicas. La primera tapa (Figura 5) se utilizó para cubrir la sílica gel mientras ésta era empacada en la celda, la segunda tapa (Figura 6) se utilizó para distribuir uniformemente la solución acuosa con la que se inundó el medio poroso previo a los experimentos electrocinéticos. Finalmente, la tercera tapa (Figura 7) se utilizó como plantilla para la recolección de muestras de solución acuosa durante los experimentos electrocinéticos y para registrar los valores del potencial eléctrico en dichas posiciones del medio poroso por medio de los electrodos pasivos.

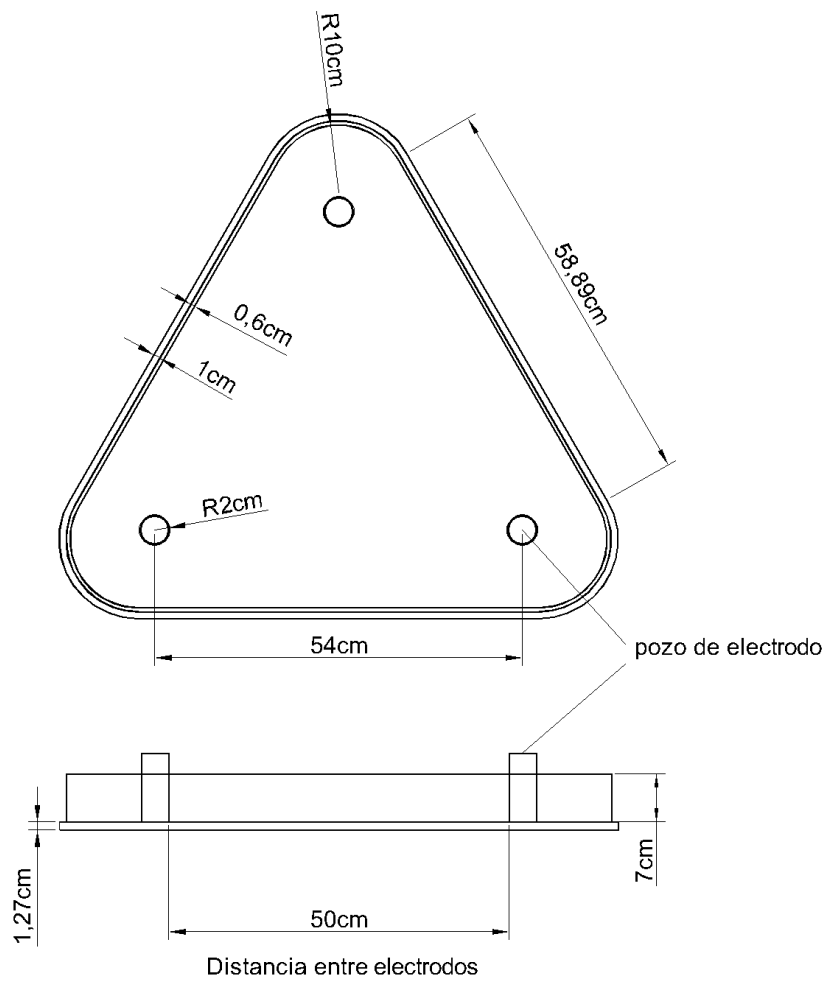


Figura 3. Vista superior y lateral de la celda experimental para el desarrollo de los experimentos electrocinéticos en dos dimensiones.

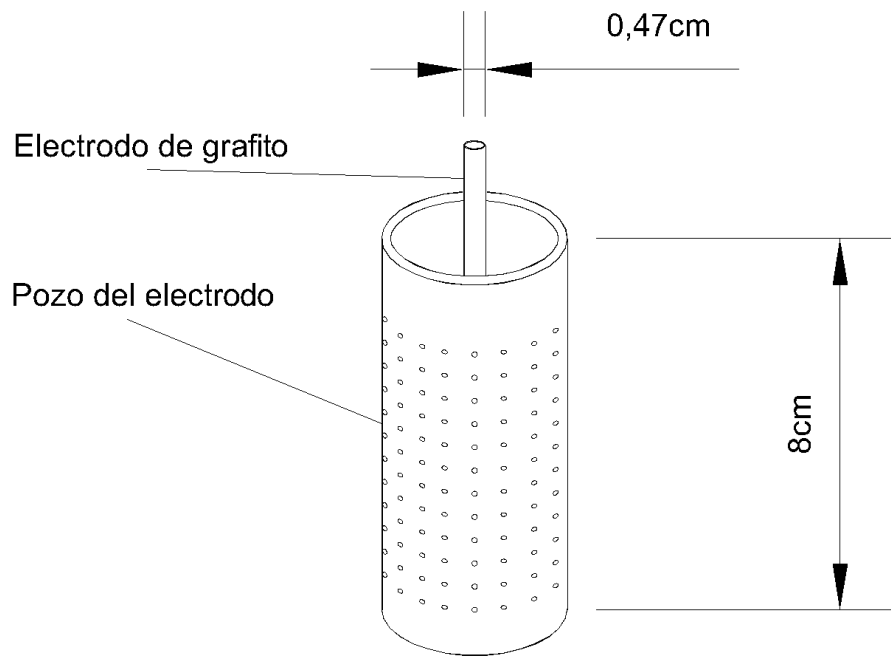


Figura 4. Detalle de los pozos de electrodos en la celda experimental.

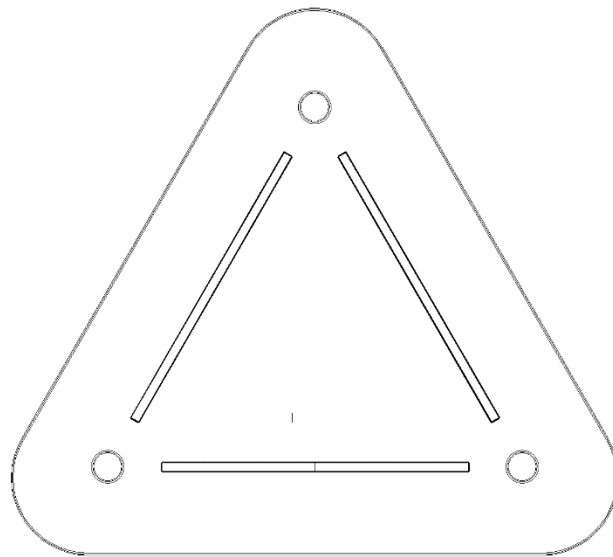


Figura 5. Tapa de acrílico para el empacado del medio poroso en la celda experimental.

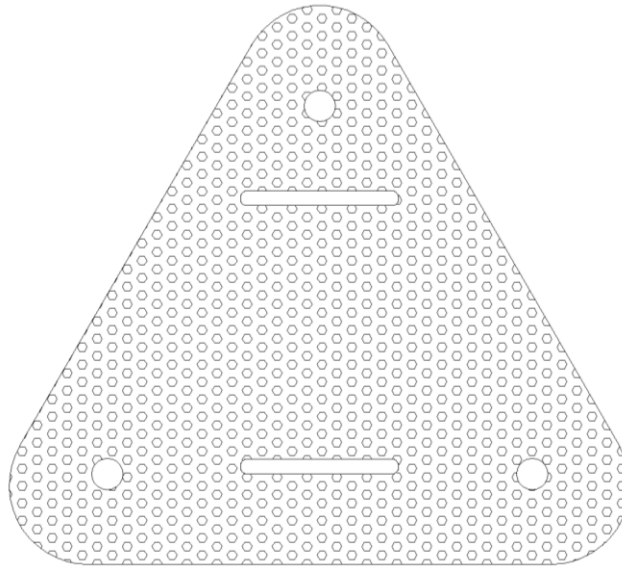


Figura 6. Tapa de acrílico utilizada para irrigar el medio poroso con la solución de sulfato de cobre

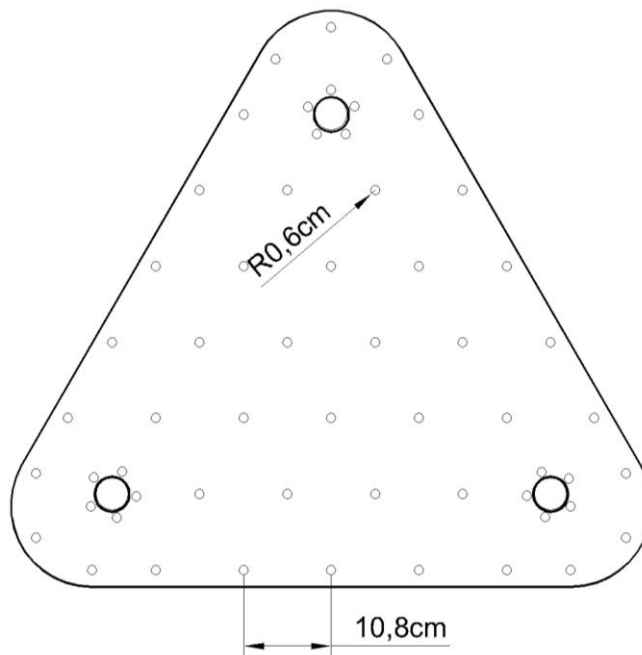


Figura 7. Tapa de acrílico con orificios para recolección de muestras acuosas e inserción de electrodos pasivos para medición de potencial eléctrico.

3.2 Caracterización del medio poroso.

Se utilizó sílica gel como medio poroso. Este material es un sólido amorfo, inodoro, de color blanco, no tóxico. Su fórmula química nominal es $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Figura 8), es químicamente estable, de estructura porosa y alta área superficial (Figura 9); es hidrofílica, fácil de manejar y puede ser regenerada calentándola a condiciones específicas, para utilizarla nuevamente (45).

Con el fin de verificar que la sílica gel se comportara como material inerte durante los experimentos electrocinéticos, se preparó un litro de una solución con una concentración de Cu de 60 mg/L y un valor de pH de 5. De esta solución se tomaron cinco alícuotas de 200 ml cada una. Las alícuotas se analizaron mediante un espectrómetro de absorción atómica marca PERKIN-ELMER, modelo 3100 para verificar la concentración de Cu de la solución. Posteriormente, se añadió a cada muestra 100 g de partículas de sílica gel. La suspensión de sílica gel y solución acuosa se dejó reposar durante 72 h. Posteriormente, se tomaron alícuotas de 1 ml de la solución sobrenadante de cada muestra y se aforaron a 20 mL con agua destilada desionizada, para analizarlas por absorción atómica. Los resultados de los análisis no mostraron cambios significativos en la concentración de cobre en solución antes y después de ponerse en contacto con el sólido. De estos experimentos se concluye que la sílica gel no interactúa con el cobre en solución y por lo tanto se comporta como inerte para propósitos de los experimentos electrocinéticos.



Figura 8. Vista macroscópica de la sílica gel.

La figura 9 muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM) de la superficie de las partículas de sílica gel. Se observa una estructura formada por cavidades porosas irregulares de paredes lisas con pequeños fragmentos adheridos a la superficie.

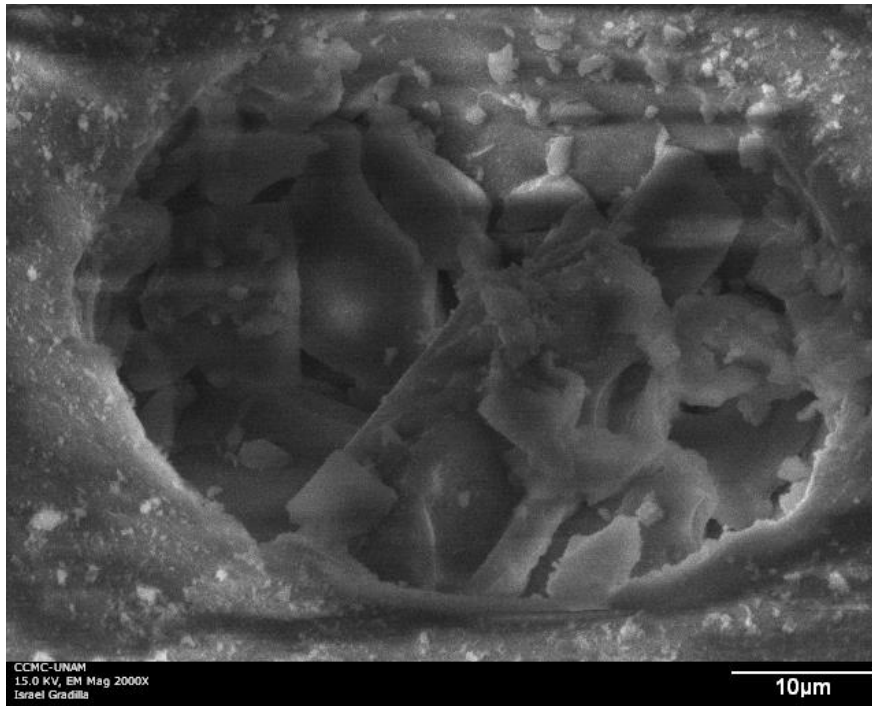


Figura 9. Micrografía de microscopía electrónica de barrido de la superficie de una partícula de sílica gel

3.2.1 Porosidad de la sílica gel.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo; la líquida por el agua (libre, específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos en menor cantidad; la fase gaseosa comprende sobretodo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.). La capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la líquida, suele incluirse en ésta última, pues es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación (secado).

Las fases líquida y gaseosa del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos. Se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal

circunstancia consta, como caso particular, de dos fases, la sólida y la líquida. Muchos suelos yacientes bajo el nivel freático son totalmente saturados. Se dice que un suelo es totalmente seco cuando todos sus vacíos están ocupados por aire. Un suelo se dice que es parcialmente saturado cuando sus vacíos están ocupados por agua y por aire.

La figura 10 representa el esquema de una muestra de suelo, en el que aparecen las fases principales, así como los conceptos de uso más común, con los símbolos que se utilizan.

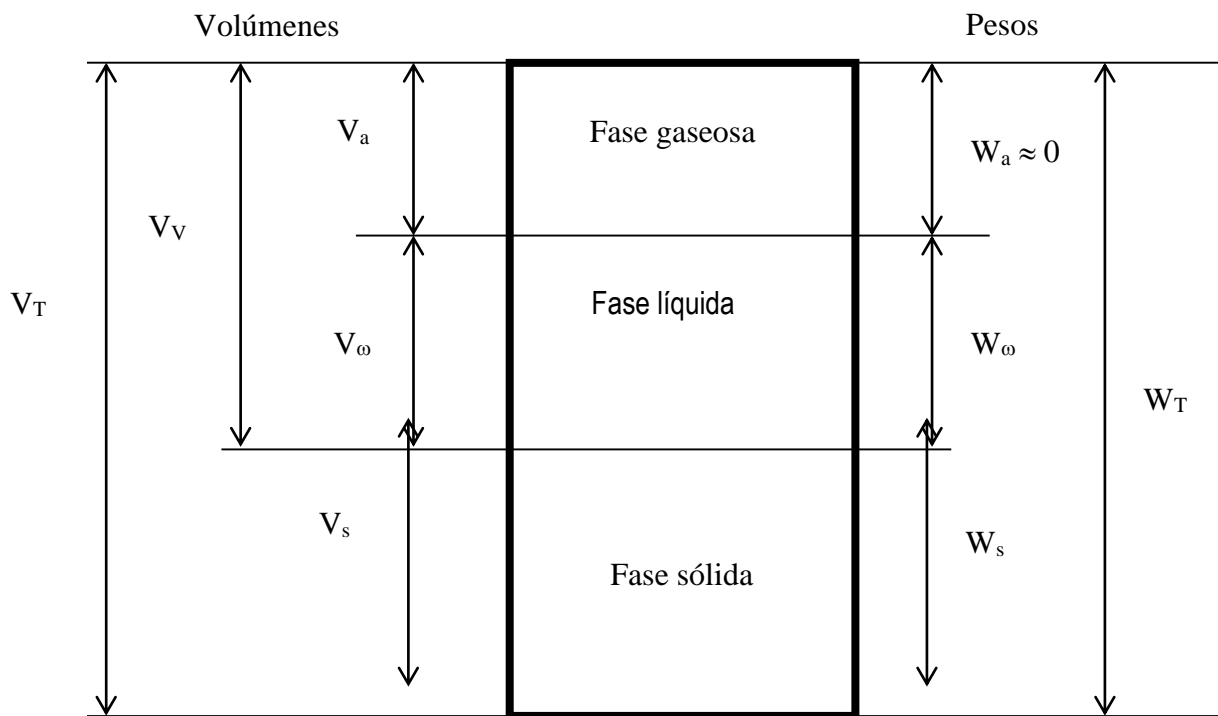


Figura 10. Diagrama de un medio poroso representado como un sistema de tres fases.

El peso total de la muestra es: $W_T = W_a + W_w + W_s$ y el volumen de vacíos: $V_V = V_a + V_w$. La figura 10 representa un esquema de un medio poroso. Se definen las siguientes relaciones:

$$\text{Peso volumétrico del agua líquida:} \quad \gamma_{\omega} = \frac{W_{\omega}}{V_{\omega}} \quad (3.1)$$

$$\text{Peso volumétrico de sólidos:} \quad \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.)$$

$$\text{Gravedad específica de los sólidos:} \quad G_s = \frac{W_s}{\gamma_o V_s} \quad (3.3)$$

$$\text{Peso volumétrico del suelo seco:} \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V_T} \quad (3.4)$$

$$\text{Porosidad:} \quad n = \frac{V_V}{V_T} = 1 - \frac{\gamma_m}{\gamma_s} \quad (3.5)$$

$$\text{Relación de vacíos:} \quad e = \frac{V_V}{V_s} \quad (3.6)$$

$$\text{Humedad gravimétrica:} \quad e = \frac{V_V}{V_s} \quad (3.7)$$

$$\text{Grado de saturación:} \quad S_r = \frac{V_{\omega}}{V_V} \leq 1 \quad (3.8)$$

Las relaciones entre las distintas fases que componen el medio poroso definidas anteriormente son importantes para estudiar el comportamiento hidráulico de la (sílica gel) y en un dado caso su comportamiento mecánico; es decir, resistencia al esfuerzo cortante y compresibilidad (46-48)

3.2.2 Determinación de la Porosidad de la sílica gel.

En esta sección se establecen los fundamentos y criterios para determinar la porosidad de la sílica gel en las condiciones dentro de la celda experimental previo a los experimentos electrocinéticos.

Se considera al medio poroso compuesto por tres fases: sólida (sílica gel), líquida (solución acuosa) y gaseosa (aire), las cuales se caracterizan por sus pesos (W_s , W_{ω} y W_a) y volúmenes (V_s , V_{ω} y V_a) respectivamente. Se supone que el peso de aire es despreciable ($W_a = 0$).

La porosidad se define como la relación que existe entre el volumen de poros y el volumen total del medio poroso.

En el caso específico a la sílica gel se le determinó el contenido de agua de saturación (ω_{sat}), esto es, el contenido de agua con que todos los poros se llenan con agua; también

la gravedad específica de los sólidos (G_s) y el peso volumétrico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$). Se conoce además el peso seco de la sílica que se colocó en la celda (W_s), así como el volumen total que ocupó (V_T). Con los datos anteriores se determina la porosidad del medio poroso mediante la ecuación (3.5). A continuación se presentan los datos experimentales y el valor de la porosidad del medio poroso.

La sílica gel se colocó en la celda experimental de tal forma que tuviera su máximo grado de acomodo; es decir, con su peso volumétrico seco máximo $\gamma_{dm\acute{a}x}$ el cual fue 0.8g/cm^3 , la gravedad específica de la sílica gel, G_s cuyo valor es 1.903 y aplicando las relaciones volumétricas y gravimétricas definidas se determinó que la porosidad de la sílica gel fue 57.96 %.

3.2.3 Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica de un medio poroso es la propiedad que posee para dejar pasar el agua a través de él. De las propiedades de los suelos, la conductividad hidráulica es la que más variación presenta debido a que está influenciada por los siguientes factores: peso específico del fluido, viscosidad del fluido, composición del suelo, estructura del suelo, contenido de finos. Los problemas de mecánica de suelos en los que interviene se refieren a la determinación de gastos de infiltración, fuerzas de filtración para el cálculo de la estabilidad de obras de tierra, etc. El flujo a través de medios porosos en régimen laminar está descrito por la Ley de Darcy:

$$k_s = \frac{V \cdot \Delta L}{\Delta h \cdot A \cdot \Delta t} \quad (3.9)$$

donde: V es el volumen de agua que atraviesa a la muestra (m^3); k_s es la conductividad hidráulica a saturación ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); Δh es la diferencia de carga hidráulica total a la entrada y salida del sistema (m); ΔL es la longitud de la muestra (m); A es el área de la sección transversal expuesta al flujo m^2 y Δt es el tiempo en el cual el volumen de agua atraviesa a la muestra de suelo s .

La determinación de la permeabilidad hidráulica se realizó con un permeámetro de carga constante mostrado en la Figura 10. El sistema experimental consiste de termómetro,

cronómetro, balanza, piedras porosas, un recipiente donde se coloca el permeámetro, un recipiente para recuperar el agua infiltrada, una probeta graduada, equipo de compactación y el permeámetro. El permeámetro de carga constante consiste de un cilindro hecho de un material de acrílico de 20 cm de largo y 7.01 cm de diámetro, el área de la sección transversal del cilindro fue 38.595 cm^2 y un sistema de suministro de agua para mantener la carga hidráulica constante.

La determinación de la conductividad hidráulica se hizo con una muestra de sílica gel colocada dentro del permeámetro con un peso volumétrico seco compacto de 0.8 g/cm^3 , la cual se compactó dentro del permeámetro reproduciendo las condiciones de compactación de la sílica gel dentro de la celda experimental.

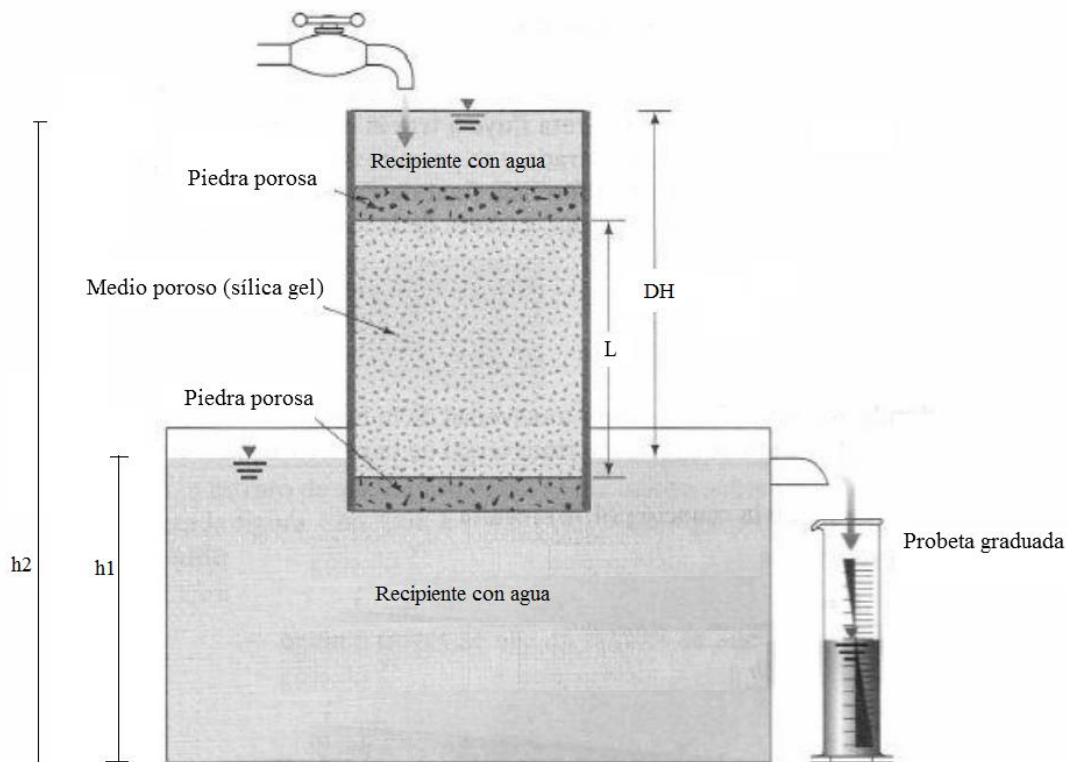


Figura 11. Permeámetro de carga constante utilizado en este estudio para determinar la permeabilidad hidráulica del medio poroso (referencia).

Una vez colocada la sílica gel en el permeámetro se procedió a saturarla por capilaridad, aumentando gradualmente el nivel del agua alrededor del permeámetro para propiciar la expulsión del aire contenido en los poros de la sílica gel y por consiguiente, la total saturación de la misma; este proceso se realizó en un lapso de 24 horas.

Antes de efectuar las mediciones, se dejó pasar a través de la muestra un volumen aproximado de 500 cm³ para garantizar que el flujo fuera establecido; hecho lo anterior, se procedió a aplicar la diferencia de carga hidráulica entre la entrada y la salida del medio poroso, el gradiente hidráulico con el cual se hicieron las pruebas fue de 0.81 cm/cm, con el cual se evitó el problema de alteración de la muestra. Las mediciones consistieron en medir el volumen de agua infiltrado, el tiempo correspondiente y la temperatura del agua. Se realizaron mediciones por quintuplicado. El valor de la conductividad hidráulica se calculó promediando los valores de las cinco lecturas obtenidas a partir de la ecuación (4.9):

Los resultados de la conductividad hidráulica de la sílica gel obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las pruebas de determinación de conductividad hidráulica para sílica gel

Muestra	γ_d (g/cm ³)	Longitud (cm)	Área (cm ²)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	DH (cm)	Peso de agua	Temp. (°C)	Tiempo (s)	K_s (cm/s)	K_s prom. (cm/s)
Sílica gel	0.8	14.00	38.595	21.90	10.50	11.40	64.10	21.2	1416.68	0.001439721	1.05698E-03
				21.90	10.50	11.40	26.30	21.7	1168.50	0.000716175	
				21.90	10.50	11.40	32.00	22.0	1180.58	0.000862475	
				21.90	10.50	11.40	34.60	22.0	1111.26	0.000990724	
				21.90	10.50	11.40	50.60	22.0	1262.01	0.001275792	

El valor de k_s es el promedio de las cinco pruebas realizadas.

En virtud de lo anterior, la constante específica de permeabilidad de un material es la permeabilidad intrínseca (K), tiene dimensiones de m² o Darcy y está relacionada con la conductividad hidráulica, (k_s) en m/s de la siguiente manera (49):

$$K = \frac{k_s \cdot \mu}{\rho \cdot g} \quad (3.10)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, ρ densidad del líquido y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Para determinar la permeabilidad intrínseca fue necesario conocer la conductividad hidráulica (46).

Al mismo tiempo fue necesario calcular la viscosidad dinámica del agua a 22°C la cual es 0.000955 kg m⁻¹ s⁻¹ y su densidad 1000 kg/m³ (50). Finalmente, de la ecuación (4.10) se determinó la permeabilidad intrínseca que es el parámetro de entrada del modelo matemático. El resultado fue 6.9x10⁻¹¹ m².

3.2.4 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica de un material es la capacidad que éste tiene para permitir el flujo de electrones libres causado por una diferencia de potencial eléctrico aplicado al material. La determinación de la conductividad eléctrica del medio poroso se realizó mediante el sistema experimental mostrado en la Figura 12. El sistema consiste de una celda de acrílico de 0.1 m de largo, 0.05 m de ancho y 0.05 m de profundidad en cuyo interior se colocaron 200 g de sílica gel. La celda de acrílico contiene dos discos de aluminio de 0.035 m de diámetro, los cuales se utilizan como electrodos, separados entre sí por una distancia de 0.02 m.

Por medio de una fuente de voltaje marca Hewlett Packard, modelo 33120 A se aplicó una diferencia de voltaje de 1.5 V entre los electrodos. Mediante un amplificador síncrono (lock – in amplifier), marca Standar Research, modelo SR510 (Figura 13), se midió la corriente eléctrica a través de la muestra, la cual resultó ser de 1.10x10⁻⁹ amperes. A partir de la Ley de Ohm (ecuación 3.11) se calculó el valor de la resistencia eléctrica de la muestra.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.11)$$

donde, I es la corriente eléctrica en amperes, V es el voltaje aplicado entre electrodos y R es la resistencia eléctrica total en ohms. El valor resultante fue de 1.42x10⁸ ohms (51).

Al mismo tiempo, se determinó la conductividad eléctrica de la muestra de sílica gel, cuya longitud y área se aproximó con la ecuación (3.12).

$$\sigma = \frac{L}{R.A} \quad (3.12)$$

Donde, σ es la conductividad eléctrica de la sílica gel en $S m^{-1}$, A es el área de sección transversal en m^2 , y L es la separación entre electrodos en metros. El valor de la conductividad eléctrica de la muestra de sílica gel resultante es: $\sigma = 1.47 \times 10^{-10} S m^{-1}$.



Figura 12. Celda experimental para la medición de la conductividad eléctrica de la sílica gel.

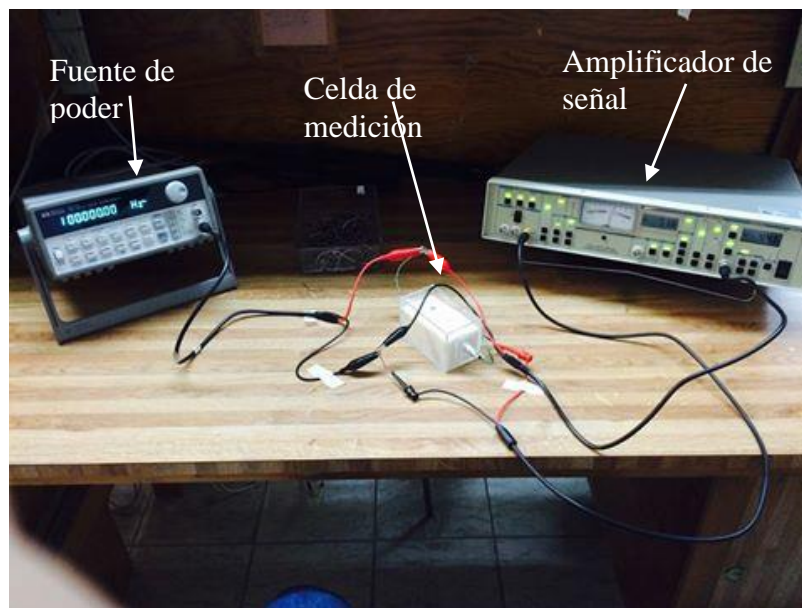


Figura 13. Sistema experimental para la medición de la conductividad eléctrica de la sílica gel.

3.2.5 Determinación del Potencial Z.

Existen numerosos fenómenos electrocinéticos que tienen en común la característica que relaciona el movimiento relativo entre dos fases adyacentes cargadas eléctricamente. En el presente caso, una superficie sólida y una solución. Uno de estos fenómenos es el

potencial zeta; el cual se genera en la frontera de la región de stern y la capa difusa. El potencial zeta es el potencial generado en el plano de desplazamiento entre la superficie sólida y el fluido en movimiento. (52).

La determinación del potencial zeta entre la superficie de la sílica gel y la solución acuosa se llevó a cabo mediante un zetámetro marca Zeta-meter 3.0. Con este fin, en un mortero de ágata se molió una muestra de sílica gel. Ésta se hizo pasar a través de la malla de 127 micras. Se tomaron 10 g de sílica gel molida y se mezclaron en 100 mL de agua destilada desionizada, hasta tener una solución coloidal de 10% de sólidos en peso. La solución se colocó en la celda del zetámetro. Primeramente se lavaron los dos electrodos de la celda, un ánodo y un cátodo con agua desionizada para asegurarse de que no tuvieran contaminación de ningún tipo. Se enjuagó la celda dos veces con la muestra a analizar. Después se llenó totalmente la celda con muestra y se colocaron los electrodos cuidadosamente. Se verificó que no queden burbujas atrapadas dentro de la celda para evitar errores en la medición. Se conectaron los electrodos al equipo de medición (Zetámetro versión 3.0) (Figura 14). Se aplicó una diferencia de potencial de 100V, generando un campo eléctrico que atravesó la celda de medición. Las partículas de sílica gel, migraron bajo la influencia del campo eléctrico, su movimiento y dirección se observaron a través de los oculares, se midió el tiempo en el que una partícula recorría la distancia entre dos marcas impresas en cada uno de los oculares; se realizaron 30 observaciones y el equipo registró los diferentes tiempos. El equipo calculó la movilidad electroforética de cada partícula observada, la cual es expresada como micrones/segundo por voltios/centímetro. El primer término representa la velocidad de la partícula, mientras que el segundo es una expresión de la fuerza eléctrica del campo. El potencial zeta fue calculado por el equipo a partir del promedio de las medidas de la movilidad electroforética y en base a la ecuación de Smoluchowsky.

$$P_z = \frac{4\pi\mu_t}{D_t} EM \quad (3.13)$$

Donde EM es la movilidad electroforética a la temperatura de medición, μ_t es la viscosidad del fluido a la temperatura de medición t , D_t es la constante dieléctrica de la

solución y P_z es el voltaje electrostático o potencial zeta en mili volts. El potencial zeta determinado a partir de dichas mediciones fue de $-42 \times 10^{-3} \text{ V}$



Figura 14. Equipo de medición de potencial zeta utilizado con una muestra de sílica gel.

La Tabla 3 resume las propiedades físicas de la sílica determinadas experimentalmente.

Tabla 3. Propiedades físicas de la sílica gel determinadas experimentalmente

Propiedad física	Valor	Unidades
Permeabilidad intrínseca, K	6.9×10^{-11} .	m^2
Porosidad, n	57.96	%
Conductividad eléctrica, σ	4.2×10^{-10}	S .m
Potencial Zeta, ξ	-42×10^{-3}	V

3.3 Experimentos Electrocinéticos.

Los experimentos electrocinéticos consistieron de las siguientes etapas: (1) acondicionamiento del medio poroso para garantizar la reproducibilidad de los experimentos; (2) saturación del medio poroso con solución de sulfato de cobre ; (3) aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre electrodos para iniciar el proceso electrocinético, (4) captura de datos experimentales de voltaje, concentración de cobre y

pH en toda el área del medio poroso y (5) muestreo de la solución acuosa en el medio poroso para determinar las condiciones iniciales de concentración de cobre y pH. Dichas etapas se detallan a continuación.

El acondicionamiento del medio poroso se llevó a cabo de la siguiente manera. Inicialmente, se adhirió papel filtro alrededor de los pozos de los electrodos activos para evitar que las partículas de sílica gel entraran. (figuras 3 y 4). Se pesaron 8 kg de sílica gel y se colocó dentro de la celda experimental. La celda y su contenido fueron colocados en una mesa compactadora diseñada exprofeso mostrada en la Figura 15. Se hizo funcionar la mesa compactadora durante 1 minuto; en ese período y cada 3 segundos, la celda se elevó 20 veces hasta una altura de 2.54 cm para posteriormente caer libremente. Al cabo de este procedimiento se alcanzó la compactación del medio poroso con una densidad aparente de 0.8 g/cm^3 y una altura de la cama de 3.5 cm (figura 15).

Enseguida se llevó a cabo la saturación del medio poroso colocando la tapa perforada (figura 6) sobre la celda experimental. Después se irrigan 7.76 L de solución de sulfato de cobre, equivalentes al 97% en peso de sílica gel.

Luego se insertaron los electrodos activos de grafito, un ánodo y dos cátodos (Figura 4 y 5). Asimismo se insertaron 57 electrodos pasivos de titanio en toda el área del medio poroso para capturar los datos de voltaje cada hora y durante las 96 que duró cada experimento.

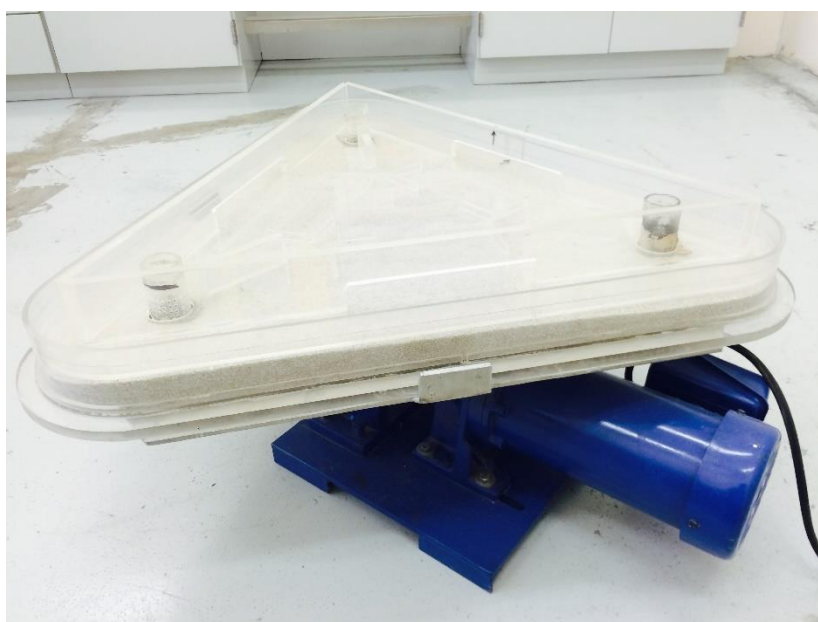


Figura 15. Celda experimental y mesa compactadora, 20 golpes por minuto.

Cada electrodo pasivo fue removido temporalmente para tomar las muestras de solución de para determinar concentración de Cu total y pH en los 57 puntos de muestreo a 0, 24, 48, 72 y 96 horas.

Posteriormente, se utilizó una fuente de poder marca Serensen, modelo DLM 150-4 para aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos activos durante 96 horas; cada hora, se capturaron los datos de voltaje en los 57 electrodos pasivos, los cuales fueron enviados a una computadora mediante un dispositivo electrónico (Figura 16). Con la fuente de poder encendida y Cada 24 horas se tomaron muestras de 0.2 ml de solución (114 en total) utilizando una micro pipeta calibrada para recolectar 0.2ml de solución; la mitad de ellas se utilizaron para determinar la concentración de Cu, mediante un espectrómetro de absorción atómica Perkin-Elmer, Modelo 3100; la otra mitad de las muestras se utilizaron para medir el pH con un potenciómetro Hanna, modelo pH 209 (Figura 17).



Figura 16 Vista del sistema experimental.



Figura 17. Recolección de muestras de solución acuosa en la celda experimental.

Una vez concluido cada experimento, la sílica gel fue retirada de la celda para después ser sometida a un proceso de secado en una mufla EELISA, modelo GBE a una temperatura de 110°C durante 24 horas. Una vez seca la muestra, fue homogenizada usando un cuarteador de muestras (Figura 18), el proceso se repitió cinco veces para garantizar la homogeneidad de la muestra. Finalmente, los siguientes experimentos se repitieron a partir del paso 2.

Los experimentos electrocinéticos se realizaron utilizando concentración inicial de Cu en solución de 100 y 300 mg/L; los voltajes aplicados entre electrodos fueron: 20, 30, 40 y 50 V (tabla 4).



Figura 18. Cuarteador utilizado para homogenizar las muestras de sílica gel.

Tabla 4. Diseño Experimental para los Experimentos Electrocinéticos.

Experimento No.	Concentración inicial, Cu, mg/L	Potencial eléctrico aplicado entre electrodos activos, V
1	100	20
2	100	30
3	100	40
4	100	50
5	300	20
6	300	30
7	300	40
8	300	50

3.4 Modelo computacional.

El modelo computacional utilizado en este trabajo de investigación tiene el propósito de cuantificar los mecanismos de transporte más relevantes que ocurren en el proceso de eliminación electrocinética de cobre en el medio poroso. El modelo fue desarrollado en dos dimensiones y está basado en el código original de Jacobs y Probstein (2).

Debido a que una descripción detallada del modelo matemático fue publicada por los autores (2) solamente, se hará una breve descripción en esta sección. La ecuación de continuidad para la *i*-ésima especie acuosa, se escribe como:

$$\frac{\partial \psi C_i}{\partial t} + \nabla \cdot \psi N_i = \psi R_i \quad (3.14)$$

donde R_i es la velocidad volumétrica neta de producción de las especies químicas i debido a las reacciones químicas, y C_i es la concentración molar de la especie i en la fase líquida, referida al volumen del líquido en el poro, ψ es la porosidad del suelo.

La ecuación (3.14) es una expresión de balance de materia para la especie i en un volumen diferencial de fluido en el medio poroso. Esta expresión describe la acumulación de la especie i en el seno del fluido en cualquier posición del medio poroso y a cualquier tiempo; la acumulación es representada por el primer término de la izquierda. La acumulación de la especie i depende de la rapidez con la que se lleve a cabo su transferencia en el medio poroso debido a la contribución de electromigración, electroósmosis, difusión y convección en el seno del fluido (segundo término de la izquierda). Asimismo, la acumulación se favorece si existe generación de la especie i debido a reacciones químicas homogéneas en el seno del fluido (R_i).

La solución numérica de la ecuación (3.14), es difícil de obtener mediante los métodos convencionales de diferencias finitas tales como Runge-Kutta y algoritmos relacionados. Lo anterior se debe a que los órdenes de magnitud de las reacciones químicas del término R_i , son mucho mayores que los órdenes de magnitud de los mecanismos de transporte de los términos que aparecen a la izquierda del signo de igualdad en la ecuación (3.14), lo que provoca inestabilidad numérica. Una alternativa para solucionar dicha ecuación es suponer equilibrio local en el medio poroso. Lo que permite especificar un conjunto de ecuaciones independientes T_k definidas por:

$$T_k = \sum_{i=1}^N \alpha_{ik} (C_i), \quad k=1, \dots, M \quad (3.15)$$

donde $\alpha_{i,k}$ expresa la contribución de cada especie i a la cantidad conservada k , N es el número total de especies, y M es el número de cantidades conservadas en el sistema. Las

cantidades conservadas T_k se definen de manera tal que no se ven afectadas por las reacciones químicas. Multiplicando la ecuación (3.15) por α_{ik} y considerando la sumatoria de todas las especies i , se obtiene la siguiente ecuación.

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{ik} \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot N_i \right) = \sum_{i=1}^N \alpha_{ik} R_i \quad (3.16)$$

Debido a que la cantidad de cada elemento se conserva a través de las reacciones químicas, el lado derecho de la ecuación (3.16) es igual a cero. Además la sustitución de la ecuación (4.16) en la ecuación (3.15) resulta en la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} + \sum_{i=1}^N \alpha_{ik} \nabla \cdot N_i = 0 \quad k = 1 \dots (N - M) \quad (3.17)$$

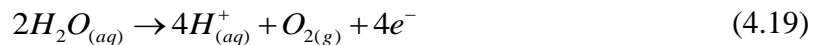
Se observa que el lado derecho de la ecuación (3.17) no contiene el término de reacción química, lo que facilita su solución numérica por las técnicas convencionales de diferencias finitas o elemento finito. La solución numérica de la ecuación (3.17) da valores de cantidades conservadas T_k como funciones del tiempo y la posición dentro del medio poroso. Una vez que los valores T_k son conocidos, la concentración de las especies individuales en la solución C_i , pueden ser determinadas a partir de la ecuación (3.18) y las relaciones de equilibrio químico.

$$K_j = \prod_{i=1}^N (C_i)^{\gamma_{ij}} \quad j = 1 \dots M \quad (3.18)$$

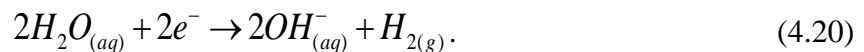
Las ecuaciones (3.17) y (3.18) son un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales con N incógnitas. Desde C_1 hasta C_N . En este estudio, el conjunto de ecuaciones fue resuelto mediante un algoritmo de Newton Rapson multivariable (53). La especificación del sistema químico fue definido de acuerdo a la metodología descrita por Butler y Cogley (54), y fue usada en el diagrama de equilibrio para el Sistema cobre–agua. Reportado por Fuerstenau y Palmer (55). El diagrama se muestra en la figura 19.

conservadas, las cuales son mostradas en la tabla 5. Además se muestran las movilidades y las difusividades efectivas de las especies químicas. Cuatro ecuaciones de continuidad para las cantidades conservadas: T_1 hasta T_4 fueron resueltas en el medio poroso. La cantidad conservada T_0 es la carga eléctrica neta en la solución acuosa, la cual debe ser cero en todo momento. Por lo tanto esta es una restricción para los valores locales de las concentraciones de las especies. La tabla 6 muestra las reacciones químicas consideradas en este estudio, así como sus constantes de equilibrio determinadas con el software HSC (56). Tales especificaciones en las reacciones son satisfechas y tienen consistencia termodinámica.

Adicionalmente a las reacciones homogéneas que ocurren en la fase acuosa, se incluye la reacción de descomposición del agua, la que ocurre en la superficie del ánodo:



En la superficie del cátodo, el agua se descompone en base a la siguiente reacción:



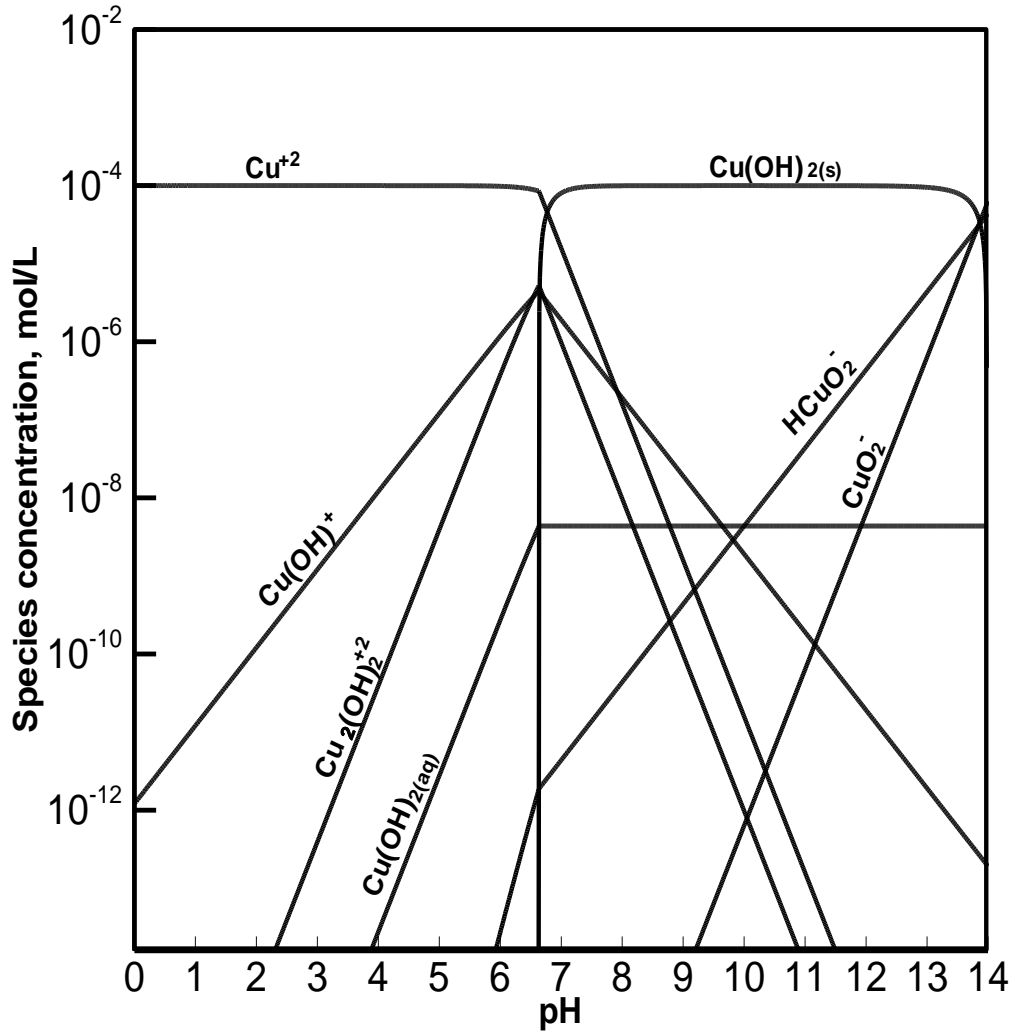


Figura 19. Distribución de las especies químicas en solución acuosa a 25°C. Concentración total de cobre, 1×10^{-4} mol/L. Adaptado por Fuerstenau y Palmer (52).

Desde el punto de vista numérico, tales reacciones representan condiciones frontera para la ecuación (4.17). El modelo también incluye las ecuaciones para calcular la densidad de carga eléctrica total, el potencial electrostático, y la distribución de presión a través del suelo. Detalles del modelo completo y la estrategia numérica global son discutidos en (2) y por lo tanto no son reportados aquí. Para propósitos numéricos, las condiciones frontera fueron establecidas lejos de las vecindades de los pozos de los electrodos de tal forma que la transferencia de masa a través de las fronteras se supuso cero. Las ecuaciones del modelo fueron resueltas en coordenadas rectangulares con un algoritmo de elemento finito y los resultados fueron analizados con el software de visualización Tecplot 360 (57).

Tabla 5. Distribución de las especies químicas y cantidades conservadas

Especies químicas	Concentración de cada especie	Movilidad* mol m/(N·s)	Difusividad efectiva† m ² /s	Cantidad conservada	Símbolo
H^+	C_1	3.7×10^{-12}	9.3×10^{-9}	Carga neta en la solución	T_0
OH^-	C_2	2.1×10^{-12}	5.3×10^{-9}	SO_4^{+2}	T_1
SO_4^{-2}	C_3	4.3×10^{-13}	10^{-9}	Total Cu	T_2
HSO_4^-	C_4	5.5×10^{-12}	1.3×10^{-8}		
Cu^{+2}	C_5	3.0×10^{-13}	7.5×10^{-10}		
$CuOH^+$	C_6	3.3×10^{-12}	8.3×10^{-9}		
$Cu_2(OH)_2^{+2}$	C_7	1.7×10^{-12}	4.1×10^{-9}		
$HCuO_2^-$	C_8	4.9×10^{-12}	1.2×10^{-8}		
CuO_2^{-2}	C_9	2.9×10^{-13}	7.1×10^{-10}		
$Cu(OH)_2(s)$	C_{10}	0	0		
$Cu(OH)_2(aq)$	C_{11}	3.7×10^{-12}	9.3×10^{-9}		

*Calculada por el método de Vanýsek (58)

Tabla 6. Reacciones químicas y constantes de equilibrio calculadas con el software HSC (56)

Reaction number j	Chemical reaction	Equilibrium constant K_j
1	$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^-$	10^{-14}
2	$Cu^{+2} + H_2O \leftrightarrow CuOH^+ + H^+$	1.2×10^{-8}
3	$2Cu^{+2} + 2H_2O \leftrightarrow Cu_2(OH)_2^{+2} + 2H^+$	3.9×10^{-11}
4	$Cu^{+2} + 2H_2O \leftrightarrow HCuO_2^- + 3H^+$	2.7×10^{-28}
5	$Cu^{+2} + 2H_2O \leftrightarrow CuO_2^{-2} + 4H^+$	1.6×10^{-19}
6	$Cu(OH)_2(s) \leftrightarrow Cu^{+2} + 2OH^-$	4×10^{-42}
7	$Cu(OH)_2 \leftrightarrow HCuO_2^- + H^+$	10^{-10}
8	$SO_4^{-2} + H_2O = HSO_4^- + OH^-$	9.7×10^{-13}

3.5 Estrategia General de Cálculo del Modelo Matemático.

La solución del modelo matemático, representado por las ecuaciones (4.14) y (4.15), se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento mostrado en la Figura 20:

A partir de la distribución espacial conocida de las especies individuales a $t = 0$,

$$\{C_1 \dots C_N\}$$

1. A partir de los datos del sistema, se calculó el valor del potencial zeta, la permeabilidad hidráulica y la difusividad de las especies.
2. Se resolvió la ecuación de continuidad de corriente, $\nabla \cdot i = 0$ (ecuación 4.21), sujeta a las condiciones de frontera apropiadas para determinar la distribución espacial de potencial electrostático $\phi(x, y, z, t)$.

$$-\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \phi) = \nabla \cdot \left(F \sum_{i=1}^N z_i \frac{D_i}{\tau^2} \nabla C_i \right) \quad (4.21)$$

3. Se resolvieron las ecuaciones de conservación de masa en el líquido del poro $\nabla \cdot u_c = 0$ (ecuación 4.22) para determinar la distribución de presión sujeta a las condiciones de frontera $p(x, y, z, t)$.

$$-\nabla \cdot (k_h \nabla p) = \nabla \cdot (k_e \nabla \phi) \quad (4.22)$$

4. Se calculó el flux de masa J_i , de las especies, a partir de las distribuciones de concentraciones conocidas, potencial electrostático, y distribuciones de presión, determinadas en los pasos 2 y 3.
5. Se integraron las ecuaciones diferenciales ordinarias que describen las condiciones frontera para encontrar los valores de las cantidades conservadas de masa en los electrodos a un nuevo tiempo $t + \Delta t$.
6. Integrar las ecuaciones de transporte sujeta a las condiciones de frontera especificadas para calcular la distribución espacial de cantidades conservadas $T_k(x, y, z, t)$ a un nuevo tiempo $t + \Delta t$.
7. Resolver las ecuaciones de equilibrio químico para encontrar la distribución espacial de las concentraciones individuales de las especies químicas a un nuevo tiempo $t + \Delta t$. $\{C_1 \dots C_N\}$

La implementación numérica del modelo matemático del proceso de eliminación electrocinética, implica grandes retos. Por ejemplo: acoplar el transporte de masa y carga eléctrica, los cuales son el resultado de los gradientes del campo eléctrico, el cual a su vez es dependiente del tiempo, la solución de complejos sistemas de ecuaciones diferenciales parciales y algebraicas. Estos factores dependen de la resolución de la malla y el tamaño del paso de tiempo para la estabilidad numérica, lo que en consecuencia puede demandar un alto consumo de tiempo de cómputo.

El código numérico usado en este trabajo fue desarrollado en FORTRAN, producto de la contribución de varios autores, entre ellos Jacobs A. (2) para generar una solución práctica y con significado físico de los mecanismos de transporte. El método de convergencia utilizado por el modelo computacional para generar la solución fue el de gradientes conjugados. Además para cada paso de tiempo se utilizó un parámetro de tolerancia de 0.7

Los resultados de las simulaciones fueron guardados en archivos ASCII y procesados con el software de visualización Tecplot 360 ex versión 2015 (57).

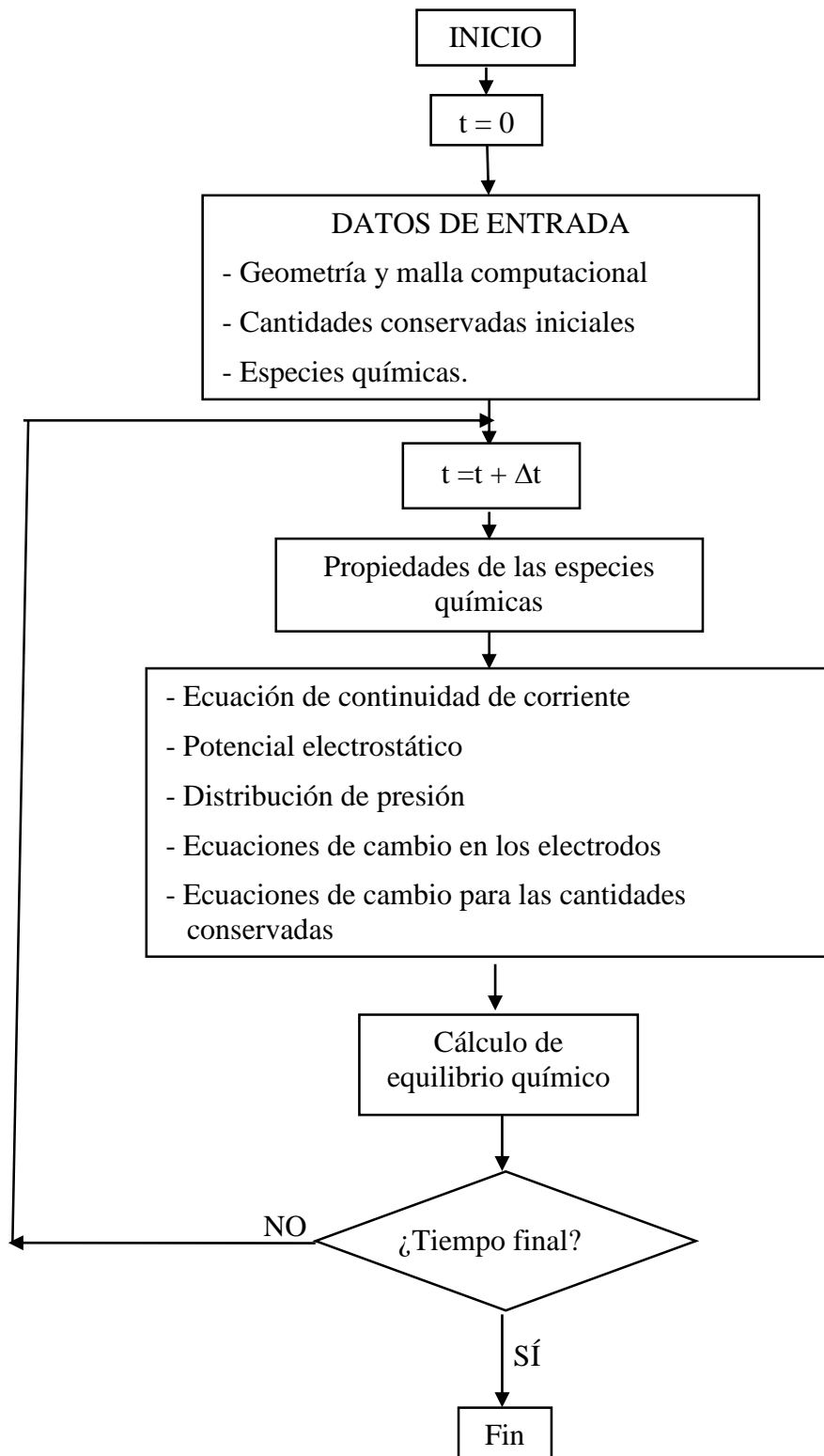


Figura 20. Estrategia general de cálculo del modelo matemático.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

En esta sección se discuten los datos experimentales obtenidos en la celda triangular a nivel laboratorio descrita en el capítulo anterior. Asimismo se discuten los resultados del modelo matemático presentado en los capítulos 3 y 4.

4.1 Resultados de los experimentos.

Por brevedad, solo se discuten los experimentos realizados con concentraciones iniciales de Cu en solución de 100 y 300 mg/L y diferencia de potencial eléctrico entre electrodos de 20 y 50 V. Se muestran los datos experimentales a tiempos de 0, 48 y 96 horas respectivamente. La evolución de los gradientes de voltaje se describió en base a la distribución generada con los datos de voltaje capturados cada hora durante las 96 horas que duraron los experimentos. Los datos de voltaje, pH y concentración de Cu, ilustran el comportamiento general observado del proceso. Los datos completos para todas las condiciones experimentales se anexan en el Apéndice A.

La figura 21 muestra los contornos de voltaje en el medio poroso cuando se usó 100 mg/L de Cu inicial en solución y se aplicaron 20 V entre electrodos. Se observa que a $t = 0$, en las cercanías del ánodo el voltaje es de 17 V, mientras que en los cátodos se aprecia una disminución considerable en los valores hasta 4 V. Al mismo tiempo, en la región central de la celda al lado del ánodo y los cátodos predominan 8 y 6 V respectivamente. Aun cuando los electrodos de grafito están conectados directamente a la fuente de poder y ésta indica 20 V, las mediciones de voltaje alrededor del ánodo muestran valores efectivos de 17 V. Lo anterior se debió a que el ánodo de carbón presenta una resistividad alta, del orden de $3.5 \times 10^{-5} \Omega \text{ m}$ (51).

Después de 48 horas, los contornos de voltaje cambiaron sustancialmente. El área de valores de 17 V, creció en un orden de magnitud en la dirección de los cátodos. Se observa que en las cercanías de los cátodos los valores de voltaje disminuyeron a 6 V. A 96 horas el área de 17 V creció 20 veces con respecto al área inicial; asimismo, en la cercanía de los cátodos y en la dirección del ánodo los valores de voltaje disminuyeron a 4 V.

El potencial eléctrico aplicado entre los electrodos provoca las reacciones electroquímicas que generan los iones hidrógeno (H^+) en el ánodo, los cuales avanzan hacia los cátodos como frente ácido, y los iones hidroxilo (OH^-) que se forman en los cátodos, su vez se mueven hacia el ánodo como frente básico, pero más lentamente que el frente ácido. Como consecuencia se incrementan la conductividad eléctrica de la solución en todo el medio poroso. Al mismo tiempo, el potencial eléctrico promueve la electromigración de las especies iónicas en solución. Cuando el frente ácido encuentra al frente básico, se forma agua, la cual tiende a diluir la solución del poro y por ende la conductividad eléctrica de la solución.

Al mismo tiempo, en la región donde chocan el frente ácido y el frente básico, se forma $Cu(OH)_{2(s)}$ que da lugar a que la conductividad eléctrica de la solución en esa región disminuya; en consecuencia, se puede observar un aumento en los gradientes de voltaje. Debido a que como se mencionó anteriormente, el frente ácido avanza más rápidamente que el frente básico en esa región localizada generalmente en las cercanías de los cátodos (59) después de 96 horas. Sin embargo, conforme transcurre el tiempo, la diferencia de potencial eléctrico entre los cátodos y el ánodo disminuye debido al aumento de la conductividad eléctrica de toda la solución.

También se espera que después de cierto tiempo transcurrido, la distribución del pH alrededor de los cátodos aumente y alrededor del ánodo, permanezca en niveles bajos.

Al mismo tiempo, el comportamiento de la distribución de pH se explica en la figura 22. A tiempo de 0 horas la distribución de pH en la celda fue uniforme, aproximadamente 2; sin embargo, en las cercanías del ánodo y en un área más pequeña alrededor de uno de los cátodos, su valor fue de 3.

Cuando transcurrieron 48 horas, se observa que en las cercanías del ánodo y en dirección de los cátodos se ve una pequeña región cuyo valor de pH es 1. En las vecindades de los cátodos, hasta 1 cm de distancia radial, el valor en el pH es 11, después el pH desciende gradualmente en todas direcciones hasta 2.

Cuando transcurrieron 96 horas, los valores de pH en las vecindades del ánodo, permanecieron con un valor de 2, pero al mismo tiempo, se observó que en el punto medio entre el ánodo y los dos cátodos apareció una región de pH con valor igual a 1. En

los cátodos por otra parte, el valor de pH aumentó bruscamente a 12, pero en un área circundante más angosta que cuando transcurrieron 48 horas.

Para una posición dada en el medio poroso, el cambio del pH se ve afectado por la cantidad de las especies acuosas que están presentes en el sistema. Esto es, la diferencia de concentración entre los iones hidrógeno y los iones hidróxido en cualquier posición en el medio poroso deben ser balanceados por otros iones para satisfacer la condición de electroneutralidad de la solución (60). El pH regula las reacciones de adsorción, desorción, precipitación, disolución, y especiación de los metales pesados. A valores de pH bajos menores a 6.5, las especies metálicas tienden a disolverse en la solución como iones cargados positivamente (3).

La figura 23 muestra los contornos de concentración de Cu total en solución a 0, 48 y 96 horas. Aunque la distribución de la concentración de Cu no es homogénea, predomina un valor de 100 mg/L.

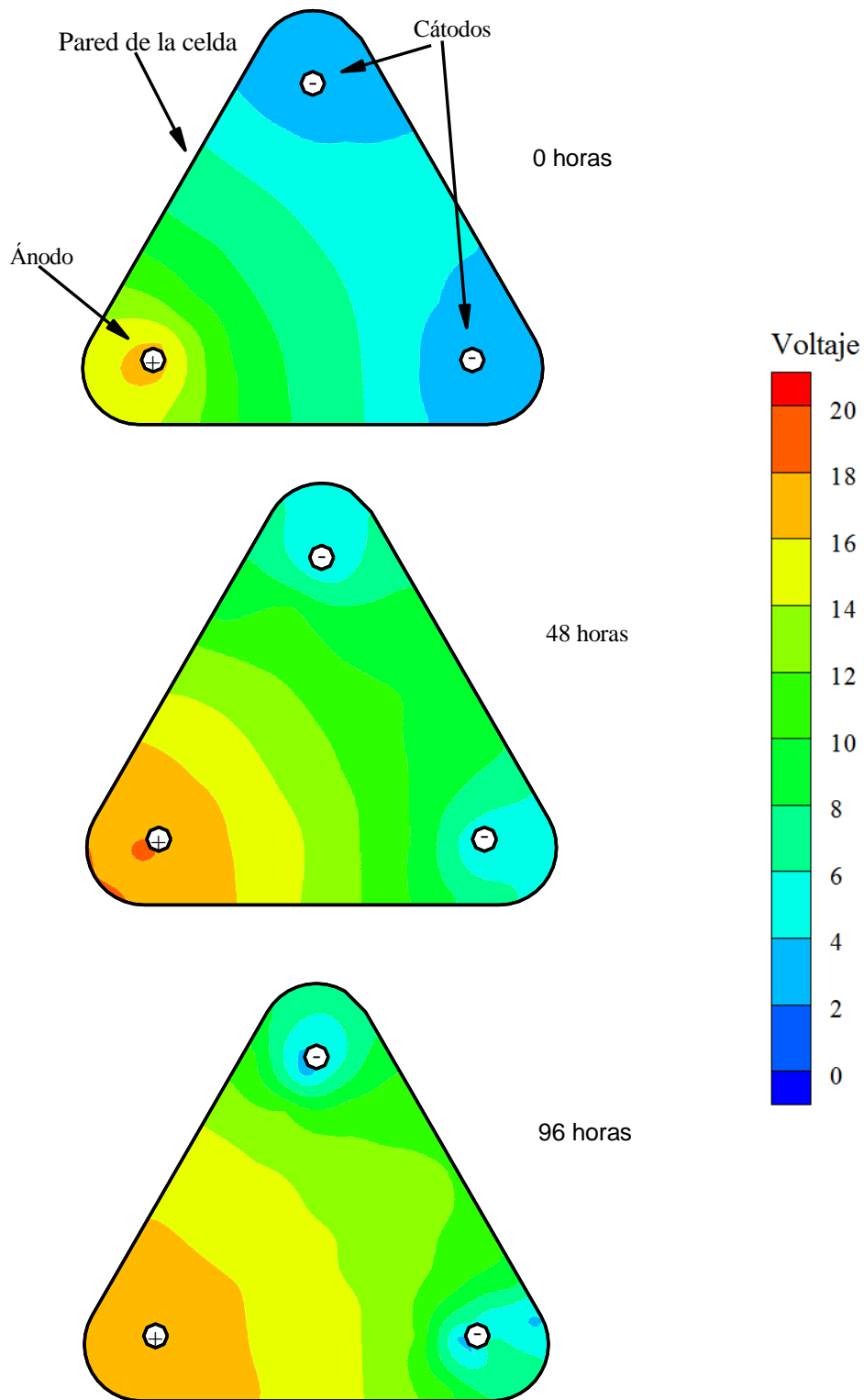


Figura 21. Voltaje aplicado entre electrodos 20 V, concentración inicial de Cu 100 mg/L, tiempo 0, 48 y 96 horas.

Aun cuando se tuvo extremo cuidado al momento de añadir la solución de Cu sobre la tapa de distribución (figura 6), se observó que en las cercanías de uno de los cátodos, la concentración de Cu, fue el doble de la concentración inicial. En las cercanías del ánodo y la pared de la celda, hay una pequeña región con una concentración de Cu menor a 40 mg/L y otra más grande en la parte central con una concentración menor que 80 mg/L.

Al cabo de 48 horas, se observan alrededor de los cátodos áreas irregulares, donde la concentración de cobre fue de 40 mg/L o menor. Al mismo tiempo, en las vecindades del ánodo y en dirección horizontal hacia uno de los cátodos, se aprecia una disminución de la concentración de Cu hasta menos de 60 mg/L.

Al término del experimento, a 96 horas, las áreas de baja concentración de Cu localizadas en los cátodos crecieron aproximadamente un 200% y la concentración de Cu total en la solución disminuyó predominantemente a 20 mg/L. Además, una zona de baja concentración de Cu de 60 mg/L, entre el ánodo y la esquina de la celda se formó; mientras que la zona de baja concentración de Cu que se había formado al lado derecho del ánodo evolucionó y se dividió en dos zonas con una concentración de Cu de 60 mg/L que se localizó en una línea recta perpendicular a la pared de la celda opuesta al ánodo; también se observó una distribución simétrica de Cu total en la solución con respecto al arreglo triangular de electrodos en la celda experimental.

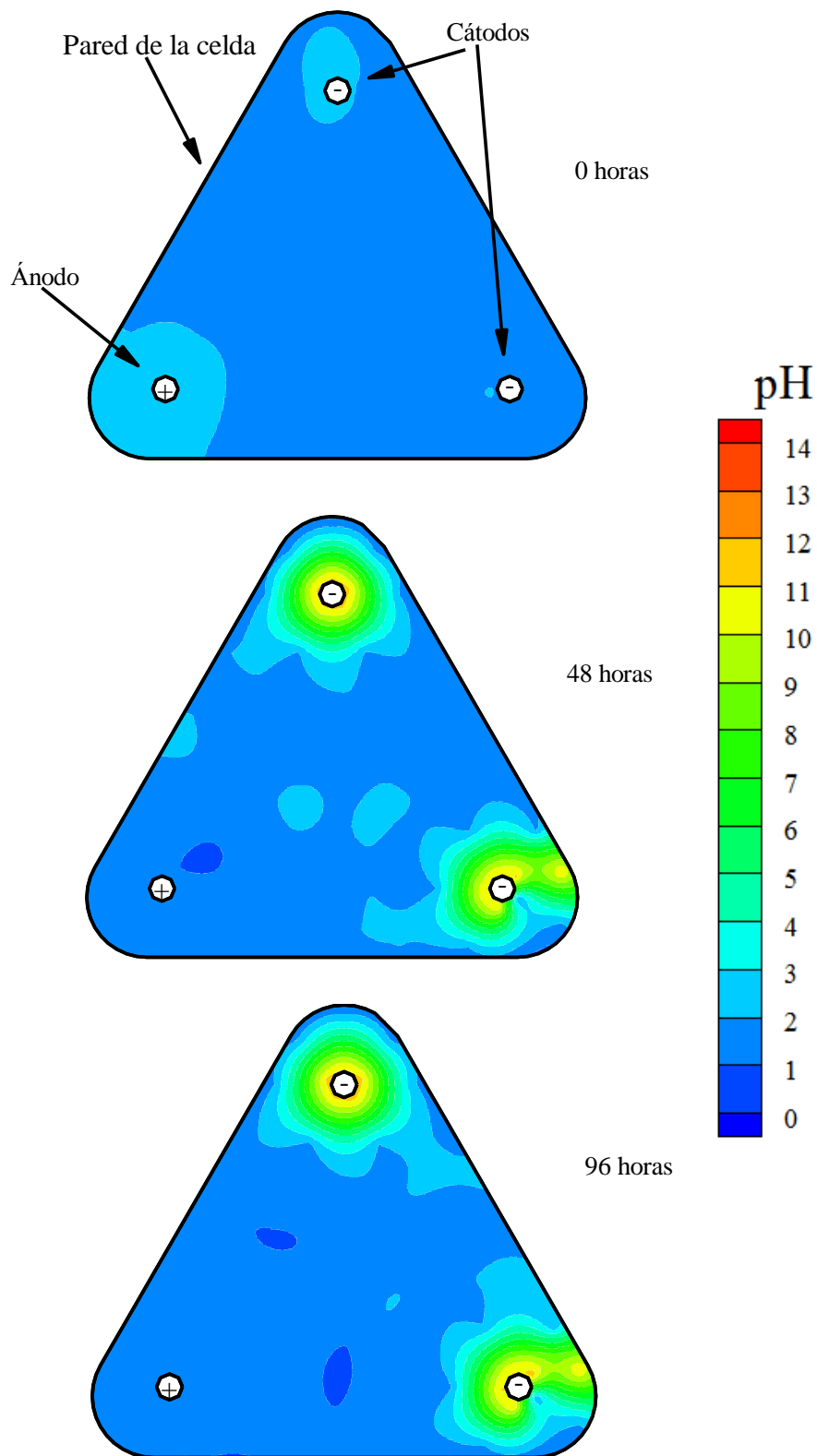
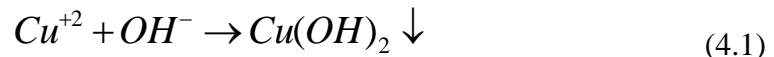


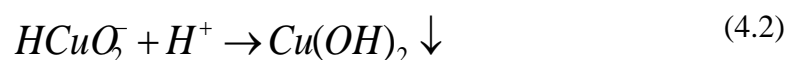
Figura 22. Evolución del pH en base a una concentración inicial de Cu de 100 mg/L y un voltaje aplicado de 20 V entre el ánodo y los dos cátodos, y tiempos de 0, 48 y 96 horas.

Los metales pesados presentan la característica de mínima solubilidad a valores intermedios de pH. Tal es el caso del cobre (Figura 18), que se encuentra cargado positivamente bajo condiciones ácidas [Cu^{+2}], cerca del ánodo. Éste al migrar hacia el cátodo encuentra la región donde se incrementa el pH y reacciona para formar hidróxidos:



A valores más altos de pH, las especies de Cu disueltas forman complejos solubles, los cuales pueden estar cargados positivamente, negativamente, o ser neutros eléctricamente, un ejemplo es el ión dicuprato: HCuO_2^{-} (Tabla 5).

Por otra parte, los iones de cobre Cu^{+2} que inicialmente se encuentran en las cercanías del cátodo, una vez que el pH se vuelve alcalino, reaccionan con los iones OH^{-} (61) para formar iones dicuprato HCuO_2^{-} , éstos posteriormente migran hacia el ánodo. Sin embargo, al llegar a la región del salto de pH, reaccionan también con los iones H^{+} (61) y se forma $\text{Cu}(\text{OH})_2$ que precipita.



Consecuentemente, la acumulación de cobre en forma de hidróxidos en la región de salto de pH o región isoeléctrica, evita que éste se desplace hacia los electrodos. Esto explica el comportamiento mostrado en la Figura 22 a tiempos de 48 y 96 horas, donde la concentración de Cu total en las vecindades de los cátodos ha decrecido debido a la formación de especies de Cu como el $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$, y el $\text{Cu}(\text{OH})_{2(aq)}$, el cual permanece en solución pero en concentraciones menores a 1.015×10^{-3} mg/L.

Cuando se aplica una diferencia de potencial eléctrico de 50 V, se observa en la figura 24 que a 0 horas, se ve una región de 45 V alrededor del ánodo que se extiende predominantemente hasta la pared de la esquina de la celda. Al mismo tiempo y en

dirección de los dos cátodos, el gradiente de potencial eléctrico, desciende simétrica y gradualmente hasta menos de 5 V, haciéndose evidente este valor en las vecindades de los dos cátodos y las esquinas redondeadas.

Después de 48 horas, la región de máximo potencial eléctrico alrededor del ánodo se duplicó y tiene un valor entre 45 y 50 V. El área de 45 V predomina en la parte central de la celda, entre ambos cátodos aparece otra región donde la diferencia de potencial eléctrico tiene un valor entre 35 y 45 V. Lo que indica un aumento considerable de la conductividad eléctrica de la solución de Cu contenida en el medio poroso. Después de las 96 horas, el tamaño de la región de voltaje entre 45 y 50 V comienza a reducirse hasta que solamente, la región entre los 35 y 40 V predomina en toda la celda, esta región alcanza su máximo tamaño y se estabiliza hasta alcanzar un 71% del área total de la celda. De igual forma, el área de 40V, ya no cambia de tamaño. Al mismo tiempo, alrededor de los cátodos los valores de voltaje descienden hasta 20 V o menos. Conforme transcurrió el tiempo, los contornos de voltaje se desplazaron hacia los cátodos.

La figura 25 muestra la evolución de la distribución del pH de la solución en el medio poroso con el tiempo. A tiempo $t=0$, el valor inicial de pH es 2. La distribución de sus valores es bastante homogénea en toda el área de la celda. Al cabo de 48 horas, en las cercanías del ánodo el pH descendió hasta un valor de uno. Simultáneamente, en el punto medio entre el ánodo y los cátodos se observan dos regiones pequeñas con valores de pH de 1 según la escala de colores de la figura. También se observa un cambio gradual en los valores de pH de 2 a 11 en las vecindades de los cátodos.

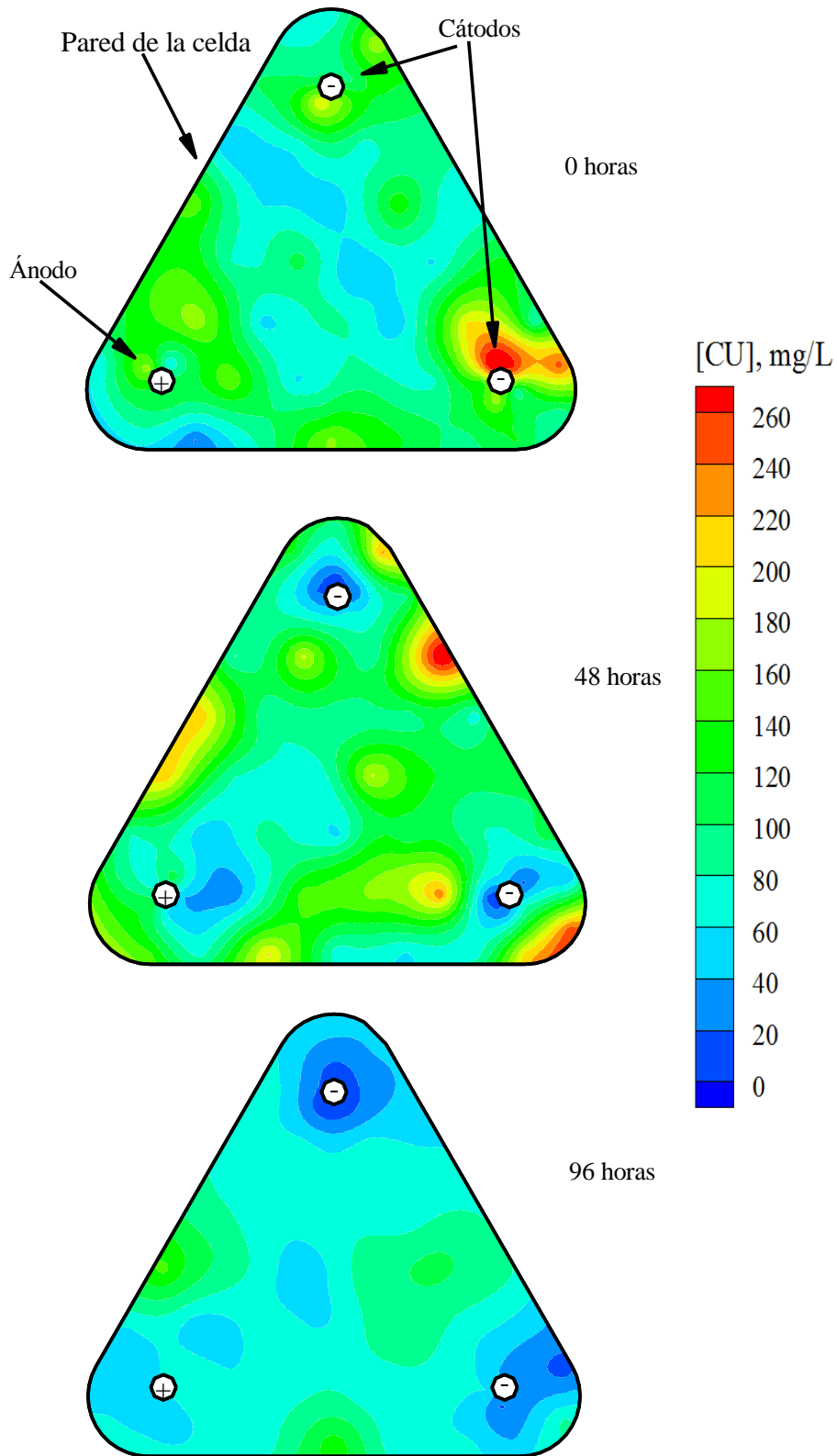


Figura 23. Contornos de Cu en el medio poroso en base a una concentración inicial de 100 mg/L, un voltaje aplicado entre electrodos de 20 V y tiempos de 0, 48 y 96 horas.

La figura 25 muestra la evolución de la distribución del pH de la solución en el medio poroso con el tiempo. A tiempo $t=0$, el valor inicial de pH es 2. La distribución de sus valores es bastante homogénea en toda el área de la celda. Al cabo de 48 horas, en las cercanías del ánodo el pH descendió hasta un valor de uno. Simultáneamente, en el punto medio entre el ánodo y los cátodos se observan dos regiones pequeñas con valores de pH de 1 según la escala de colores de la figura. También se observa un cambio gradual en los valores de pH de 2 a 11 en las vecindades de los cátodos.

Cuando se alcanzó un tiempo de 96 horas, la región con valores de pH de 1 desapareció. A este tiempo, también desapareció la región de pH igual a 1 en el punto medio del ánodo y uno de los cátodos, mientras que la zona de pH igual a 1 que se encontraba entre el ánodo y el cátodo en la distancia horizontal, se ha reducido considerablemente. Los valores de pH igual a 12 siguen predominando en las vecindades de los cátodos.

La figura 26 muestra la distribución en el medio poroso de los contornos de Cu total en la solución en el medio poro.

A $t=0$, la concentración inicial de 100 mg/L predomina en la parte media de la celda. En las cercanías de la esquina inferior derecha y el cátodo, se observa una pequeña región con una concentración de 200 a 220 mg/L. Entre el ánodo y el cátodo localizado en la parte superior de la celda, se aprecia un área con valores de concentración de Cu en el intervalo de 160 a 180 mg/L.

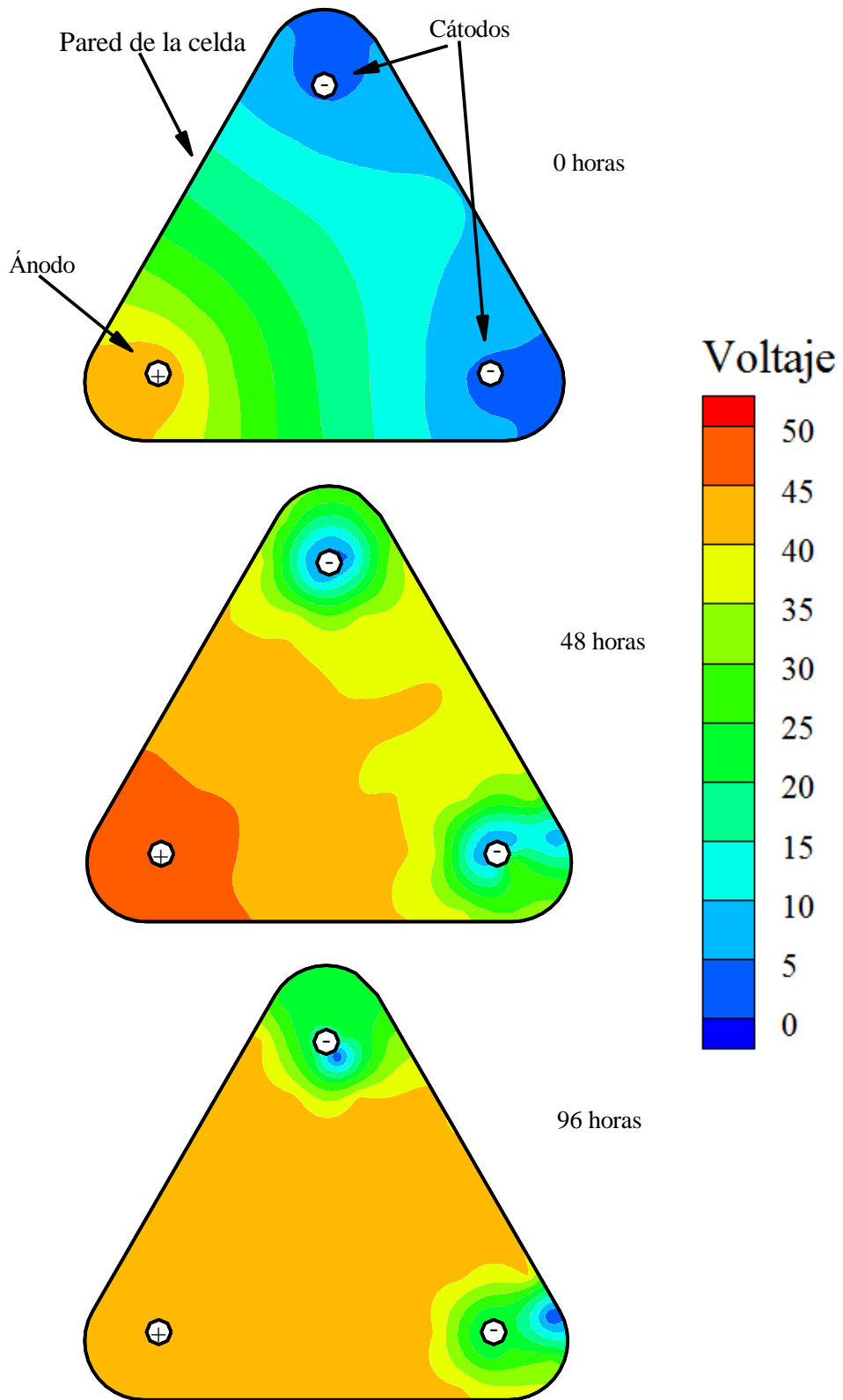


Figura 24. Voltaje aplicado entre electrodos 50 V, concentración inicial de Cu 100 mg/L, tiempo 0, 48 y 96 horas.

A un tiempo de 48 horas, en las vecindades del ánodo y en dirección horizontal a uno de los cátodos, se aprecia una región en la cual, la concentración de Cu total disminuyó hasta 40 mg/L. En las cercanías de los cátodos también la concentración de Cu se redujo hasta 20mg/L.

También se observa en la región central de la celda, un área con una concentración de Cu de 100 mg/L.

A tiempo de 96 horas, se puede ver que el área de 40 mg/L cercana al ánodo y que se observó a las 48 horas, disminuyó y se movió hacia la parte media.

A continuación se discute el efecto de la concentración inicial de Cu total en la solución en el medio poroso y el voltaje aplicado entre electrodos activos sobre la distribución de los contornos de potencial eléctrico, pH y concentración de Cu total en la solución al término de 96 horas.

La figura 27 muestra cuatro gráficas de contornos de voltaje en la celda experimental. Las gráficas inferiores tienen en común una diferencia de potencial eléctrico de 20 V, mientras que las gráficas superiores tienen en común una diferencia de potencial eléctrico de 50 V.

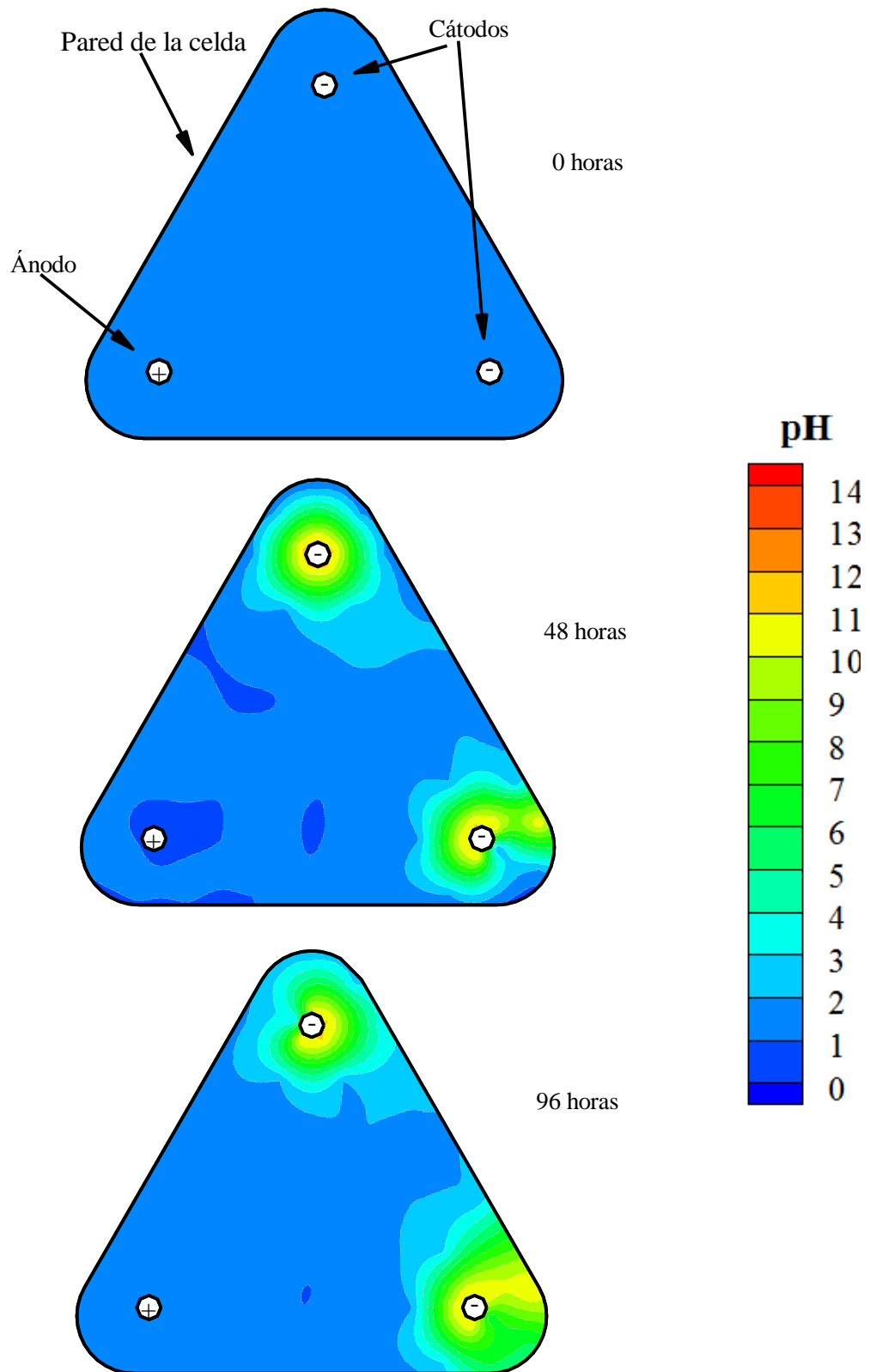


Figura 25. Contornos de pH en base a una concentración inicial de Cu de 100 mg/L, potencial aplicado entre electrodos de 50 V a tiempos de 0, 48 y 96 horas.

De izquierda a derecha, las cuatro gráficas fueron obtenidas en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, respectivamente.

En la gráfica inferior izquierda se observa una disminución simétrica en los gradientes de voltaje desde 20 V en el ánodo hasta menos de 5V en los cátodos. Esto, a consecuencia de que al final del experimento, la conductividad eléctrica de la solución aumentó gradualmente desde el ánodo hasta los cátodos con el tiempo (62). Por otra parte, en la gráfica de la derecha, se aprecia que el valor de 20V en el ánodo permanece uniforme hasta las vecindades de los cátodos. Debido a que la concentración inicial de Cu en la solución es mayor, la conductividad eléctrica en la solución aumenta (61). Entre los cátodos y las esquinas redondeadas de la celda, se observan valores de voltaje menores a 5V.

Las dos gráficas superiores de la figura 27 tienen en común un voltaje aplicado entre electrodos activos de 50 V. Para una concentración inicial de 100mg/L, se aprecia un voltaje en el ánodo de 45 V. Éste se mantiene uniforme hasta las vecindades de los cátodos, donde desciende hasta 5 V; mientras que a una concentración inicial de Cu de 300 mg/L, la distribución de voltaje desciende gradual y simétricamente desde 50V en el ánodo hasta 15 V en los cátodos.

Al mismo tiempo, cuando se comparan las gráficas para una concentración inicial de Cu en la solución de 100mg/L se observa que se ejerce un mayor efecto de la fuerza electromotriz (61) cuando se aplican 50V entre electrodos activos.

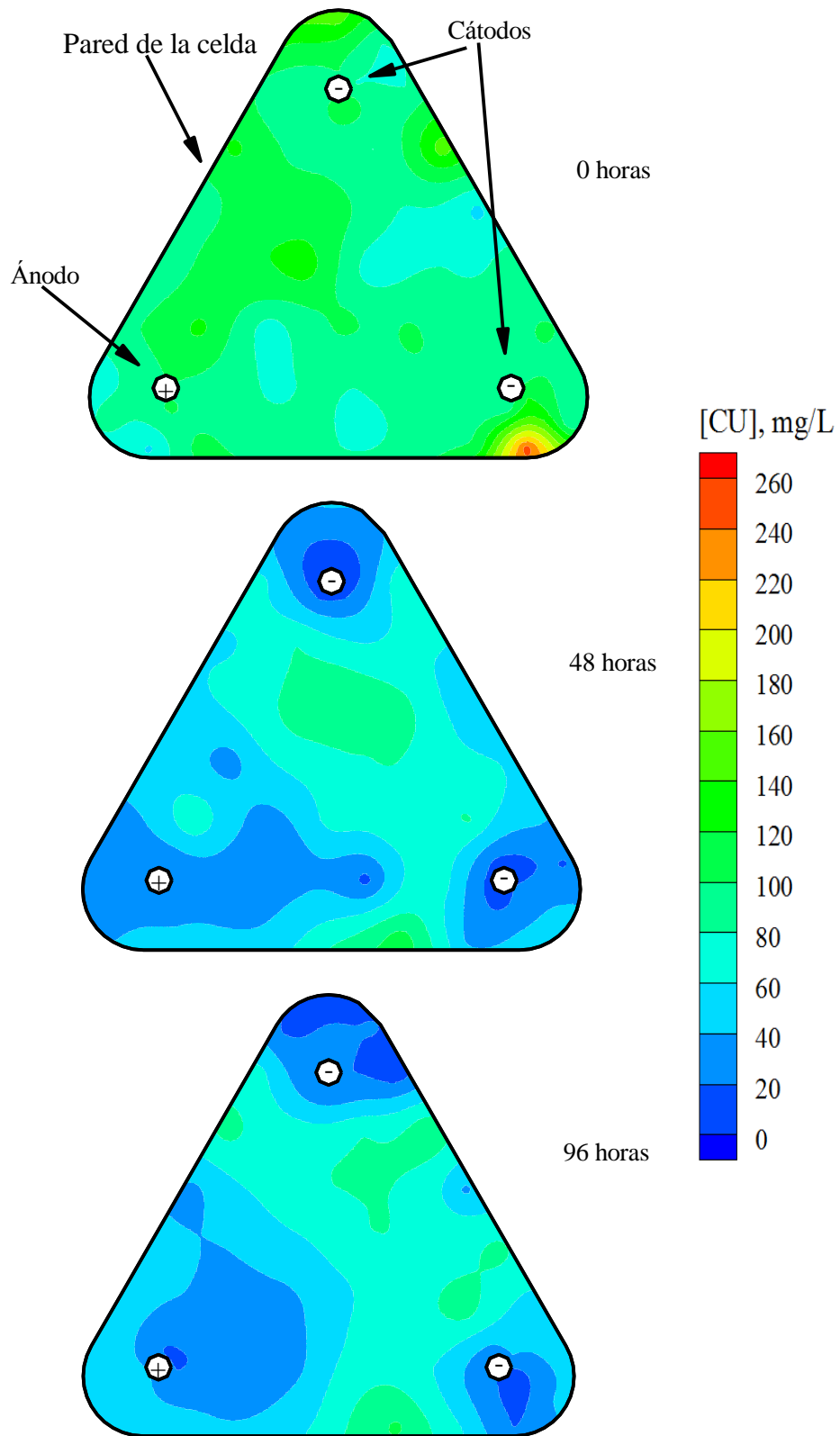


Figura 26. Contornos de Cu en el medio poroso en base a una concentración inicial de 100 mg/L, un voltaje aplicado entre electrodos de 50 V y tiempos de 0, 48, y 96 horas

En la gráfica inferior derecha de la figura 27, se observa que a una concentración inicial de Cu en la solución de 300mg/L y voltaje aplicado entre electrodos activos de 20V, los contornos desde el ánodo hasta las vecindades de los cátodos corresponden a valores de 20V, debido a una mayor conductividad eléctrica de la solución. Sin embargo, en las cercanías de los cátodos los valores de voltaje descienden hasta 5V. Para el mismo período de tiempo, en la gráfica superior derecha, se observa una disminución gradual en los valores de los contornos de voltaje, desde 45V en los ánodos hasta 15V en las vecindades de los cátodos.

En la figura 28, se comparan los perfiles de pH obtenidos al final cada experimento, entre las gráficas obtenidas en base a una concentración inicial de Cu en la solución de 100 y 300 mg/L y diferencias de potencial eléctrico aplicado entre electrodos de 20 y 50 V.

Para una diferencia de potencial eléctrico aplicado entre electrodos de 20 V, en las gráficas de la fila inferior, se observa que el frente ácido avanzó desde el ánodo hasta los cátodos más rápidamente cuando la concentración inicial de Cu fue de 100 mg/L. Sin embargo, cuando se aplicó una diferencia de potencial eléctrico entre electrodos de 50 V, el frente ácido avanzó más rápidamente cuando la concentración inicial de Cu fue de 300 mg/L.

Por otra parte, para una concentración inicial de Cu de 100 mg/L y diferencias de voltaje aplicado entre electrodos de 20 y 50 V, la velocidad con la que se desplaza el frente ácido desde el ánodo hasta los cátodos es prácticamente la misma. Por otra parte, cuando la concentración inicial de Cu en la solución es de 300mg/L, el frente ácido avanza más rápidamente cuando se aplica una diferencia de potencial eléctrico de 50 V.

La figura 29 muestra los perfiles de concentración de Cu en la solución adimensional definida como:

$$[Cu]^{\circ} = \frac{([Cu] - [Cu]_{min})}{([Cu]_{max} - [Cu]_{min})} \quad (4.3)$$

donde $[Cu]^{\circ}$ es la concentración adimensional de Cu en la solución, $[Cu]$ es la concentración de Cu en la solución en el medio poroso, $[Cu]_{\min}$ es la concentración de Cu mínima en la solución en el medio poroso; es decir, la lectura de la concentración de Cu en solución determinada experimentalmente con el espectrofotómetro de absorción atómica para un tiempo de 96 horas, $[Cu]_{\max}$ es la concentración de Cu máxima en la solución en el medio poroso, también determinada experimentalmente con un espectrofotómetro de absorción atómica a un tiempo de 96 horas.

Las cuatro gráficas representan cuatro experimentos diferentes; de izquierda a derecha se realizaron a concentraciones iniciales de Cu en la solución de 100 y 300mg/L y de abajo hacia arriba, se aplicaron diferencias de potencial eléctrico entre electrodos activos de 20 y 50 V.

Para las gráficas de 20 V, se observa un mayor movimiento de Cu desde el ánodo hacia los cátodos. Cuando la concentración inicial de Cu en la solución es mayor, se observa que en las vecindades del ánodo la concentración adimensional de Cu en la solución disminuye hasta 0.2, debido a que el Cu se desplaza hacia los cátodos con el frente ácido, con un valor de pH entre 1 y 3, a estas condiciones el Cu en solución se encuentra oxidado como Cu^{+2} ; sin embargo, desaparece de la solución en las vecindades de los cátodos debido a que se precipita cuando forma hidróxido cúprico $Cu(OH)_{2(s)}$ a valores de pH mayores de 6.5 y condiciones alcalinas presentes alrededor de los cátodos al término de 96 horas.

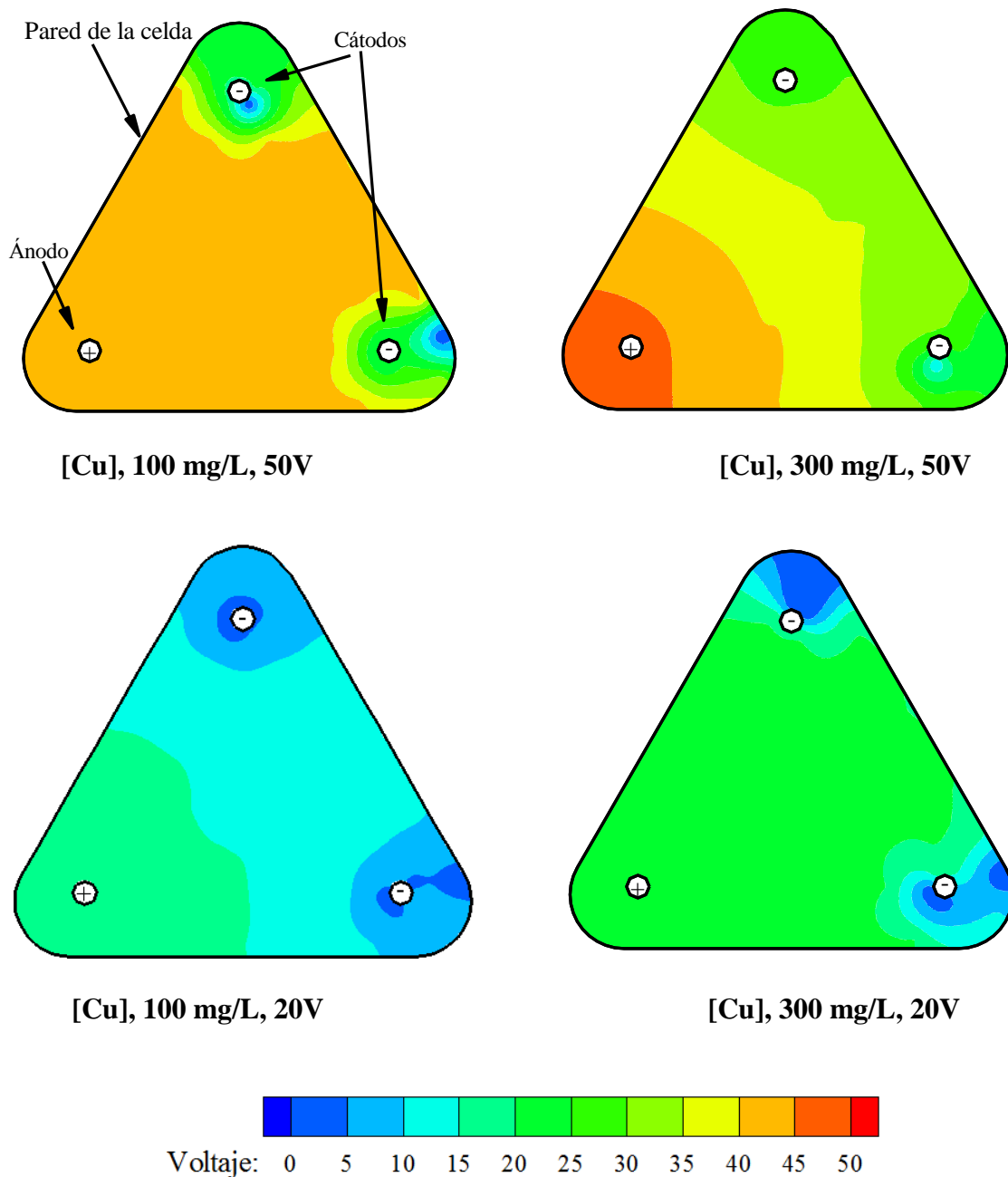


Figura 27. Contornos de Voltaje en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.

Además se aprecia una concentración adimensional de Cu de 0.9 en la región media entre los dos cátodos. En esa región, la influencia del campo eléctrico disminuye debido a que se divide entre ambos cátodos y, también disminuye el desplazamiento del frente ácido cuyos valores de pH son entre 1 y 3.

De igual forma, se observa que en las dos gráficas que tienen en común 50V, La eficiencia aumenta cuando la concentración inicial de Cu en la solución es mayor. A concentración

inicial de Cu baja en la solución, se aprecia en la gráfica de la izquierda que el Cu se mueve más rápidamente desde el ánodo hasta una franja localizada hacia las dos terceras partes de la distancia entre el ánodo y los cátodos, donde se acumula, evitando que disminuya en la solución cerca de los cátodos.

Por otra parte, a una concentración inicial de Cu en la solución de 300mg/L y 50V (gráfica superior derecha), se observa que el movimiento de Cu desde el ánodo hacia los cátodos es tal que se aprecia poca acumulación en el punto medio de la región comprendida entre los dos cátodos. Esto permite que la concentración adimensional de Cu en la solución, disminuya en las vecindades de los cátodos a cero. Al mismo tiempo, al hacer una comparación entre las dos gráficas de la izquierda, es decir a una concentración inicial de 100mg/L y voltajes aplicados entre electrodos activos de 20 y 50V, se observa que para un voltaje aplicado de 20V (gráfica inferior izquierda), se aprecia una concentración adimensional de Cu de 0.3 en las cercanías del ánodo, mientras que en las vecindades de los cátodos los valores de concentración adimensional de Cu descienden entre 0 y 0.1. En la región central del medio poroso en la celda, la concentración adimensional de Cu permanece aproximadamente entre valores de 0.4 a 0.6.

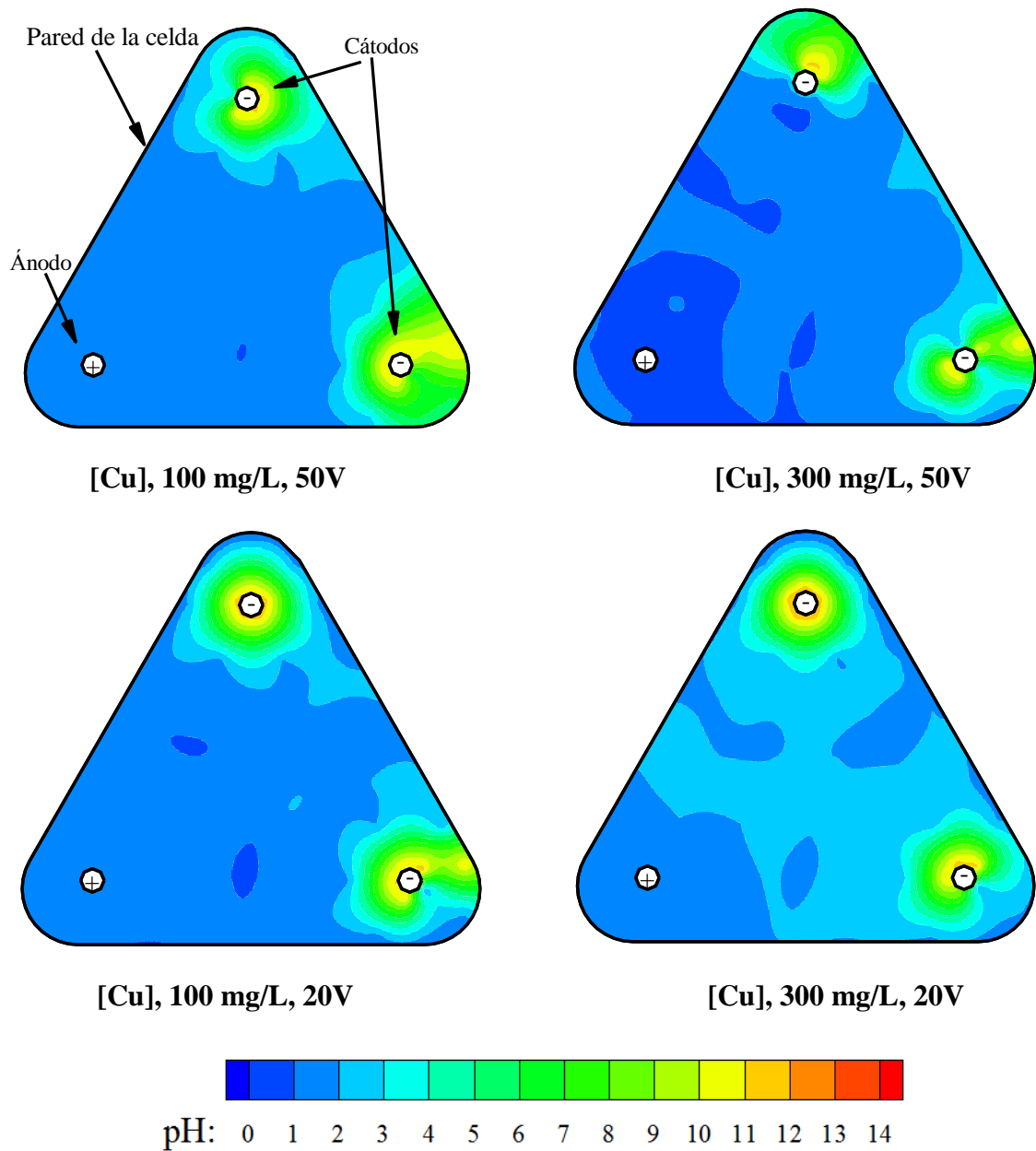


Figura 28. Contornos de pH en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.

En las vecindades de los cátodos, la concentración adimensional de Cu en la solución desciende hasta valores entre 0.1 a 0.2. Se aprecia que el proceso de eliminación transcurre lentamente. Al mismo tiempo, la influencia del campo eléctrico y el frente

ácido sobre el movimiento del Cu, hacen que éste se precipite y desaparezca de la solución.

De forma simultánea, para una concentración inicial de Cu en la solución de 300mg/L y voltajes aplicados de 20 y 50V (gráficas inferior y superior del lado derecho, respectivamente). Se observa que al aplicar una diferencia de potencial eléctrico de 50V entre electrodos, la rapidez de movimiento del Cu en la solución es mayor, debido a que en el área alrededor de los cátodos, los valores de concentración adimensional de Cu descienden hasta 0. Hay poca acumulación de Cu en la región comprendida entre los cátodos. Además, en las regiones cercanas al ánodo se aprecia una disminución en la concentración adimensional de Cu hasta 0.3. En la gráfica inferior derecha, se observan alrededor de los cátodos un área muy pequeña donde el valor de concentración adimensional de Cu en la solución, desciende hasta 0.1 mg/L. La región localizada entre los cátodos, hacia la parte central de la celda, la acumulación de Cu es más evidente.

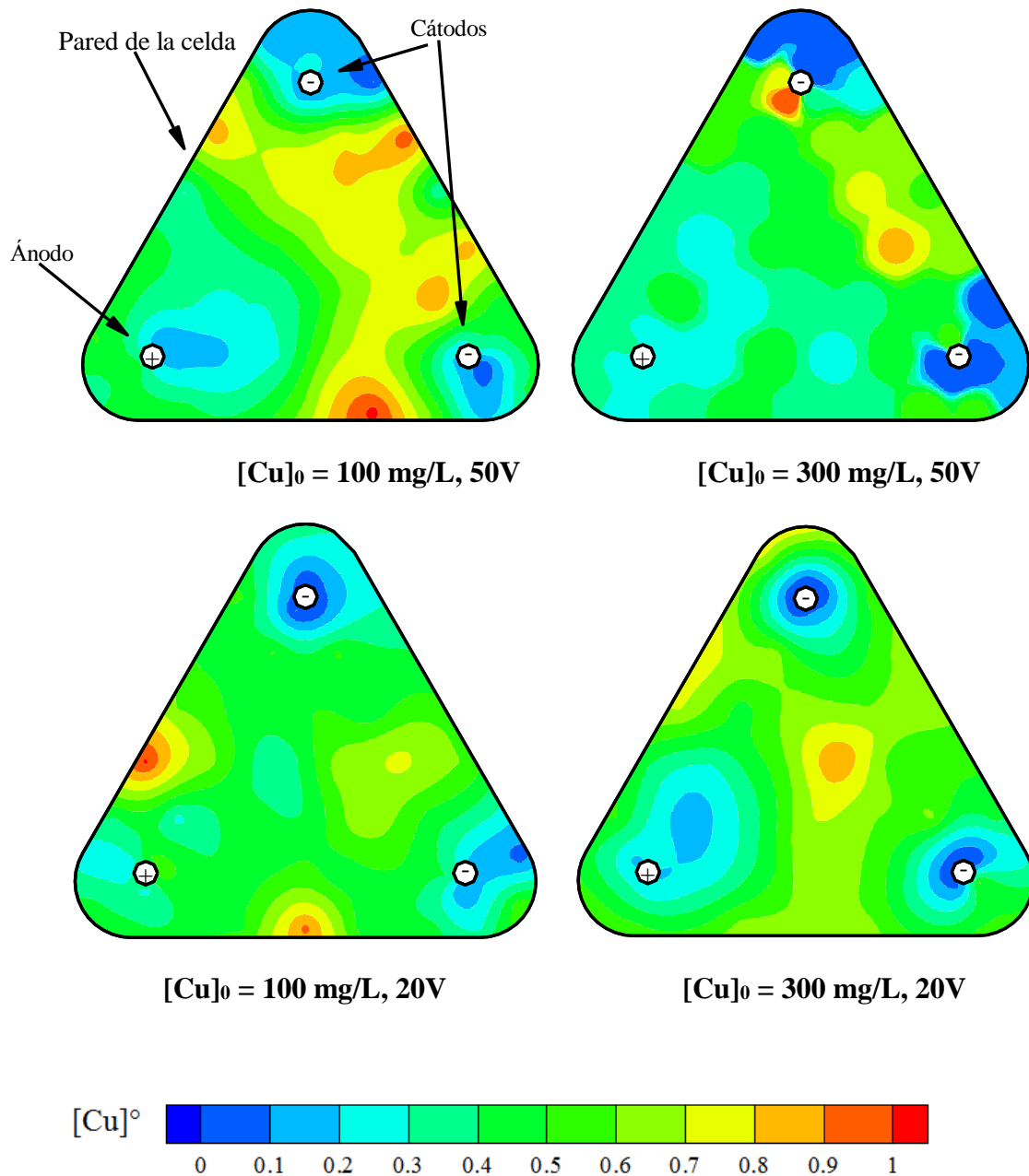


Figura 29. Contornos de Cu adimensional y normalizada en base a concentraciones iniciales de Cu de 100 y 300 mg/L, potenciales aplicados entre electrodos de 20 y 50 V a 96 horas.

Con el fin de cuantificar el efecto de la concentración inicial de Cu en solución y el voltaje aplicado entre electrodos activos sobre la movilidad del Cu en solución, se definió el % de área limpia.

$$\% \text{ de área limpia} = \frac{\text{área, } [Cu] \leq 50\text{mg/L}}{\text{área total del medio poroso}} \times 100 \quad (4.4)$$

La figura 30 muestra que al final de cada experimento, 96 horas, concentraciones iniciales de 100 y 300 mg/L de Cu en solución y voltajes aplicados entre electrodos activos de 20 y 50 V. Se observó que:

Cuando la concentración inicial de cobre fue de 100 mg/L y una diferencia de potencial eléctrico aplicado entre electrodos activos de 20 V, el área limpia resultante en el medio poroso alcanzó un porcentaje de 16.6%. Para la misma concentración de Cu pero al aplicar una diferencia de voltaje de 50 V, el porcentaje de área limpia alcanzado fue de 47.1%.

Por otra parte, para una concentración inicial de cobre de 300 mg/L y un voltaje de 50V, se observó un porcentaje de área limpia del orden de 1.5%. Cuando se incrementó el voltaje a 50 V, se obtuvo un porcentaje de área limpia de 7%.

Se observa que cuando el voltaje aplicado es de 20 V y un incremento en la concentración inicial de Cu en solución de 100 a 300 mg/L equivale a disminuir el porcentaje de área limpia en un 15%. Cuando el voltaje aplicado entre electrodos se incrementa a 50 V, un incremento en la concentración inicial de 100 a 300 mg/L provoca que el área limpia disminuya en un 40%. Es decir, a mayor concentración de cobre inicial en la solución, menor será el porcentaje de área limpia alcanzado independientemente del voltaje aplicado.

Por otro lado, aumentar el voltaje aplicado de 20 a 50 V produce un aumento del área limpia. Este aumento es de 47% cuando la concentración inicial de cobre es de 100 mg/L., y 16.5 cuando la concentración inicial de cobre es de 300 mg/L. Es decir, el efecto producido al incrementar el voltaje es mayor a menor concentración inicial de cobre en solución.

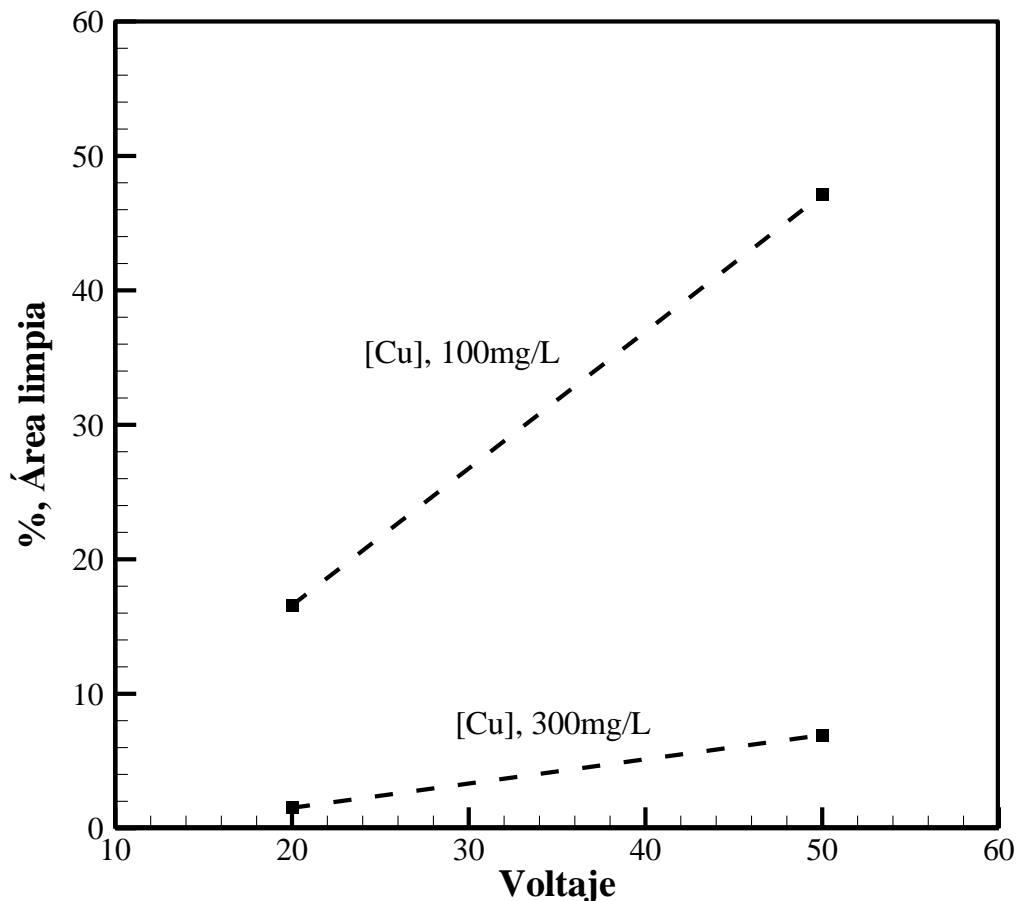


Figura 30. Porcentaje de área limpia en base a la concentración inicial de Cu en solución de 100 y 300 mg/L y voltaje aplicado entre electrodos de 20 y 50V, a un tiempo de 96 horas.

4.2 Resultados del Modelo Matemático.

En este trabajo se utilizó el modelo computacional desarrollado por Jacobs y Probstein (1996) (2) para representar el comportamiento de la eliminación electrocinética. En una primera etapa, el modelo fue adaptado para incluir la termodinámica de las especies químicas de cobre en un medio poroso. El modelo resultante fue verificado comparando sus predicciones con datos experimentales obtenidos por Moreno (16) en una celda experimental circular a nivel laboratorio. En los experimentos de Moreno (16), se utilizó un suelo natural el cual fue contaminado artificialmente con sulfato de cobre (42) previamente a los experimentos electrocinéticos. Una vez validado, el modelo fue utilizado para analizar el comportamiento de la eliminación electrocinética de cobre en un campo de suelo triangular con un ánodo y dos cátodos como electrodos activos (43). Detalles de tales estudios se anexan en el apéndice B.

En la presente sección se discuten las predicciones del modelo matemático para los experimentos descritos en el Capítulo 3.

Con el propósito de llevar a cabo las simulaciones, la geometría del sistema experimental mostrado en la Figura 16 se representó mediante una malla computacional. Dicha malla tiene por objetivo discretizar la celda experimental en un número de elementos finitos, dentro de los cuales se resolvieron las ecuaciones de cambio descritas en la sección 4. La Tabla 7 muestra los parámetros utilizados en todos los cálculos de esta sección.

Tabla 7. Parámetros del modelo matemático para la simulación del arreglo experimental.

Parámetro	Valor	Fuente
Celda triangular, longitud de cada lado	0.59 -m	(1)
Distancia entre ánodo y cátodos	0.5 -m	(1)
Diámetro de los electrodos	0.0381 -m	(1)
Diferencia de potencial eléctrico entre ánodo y cátodo, ϕ_1	20 y 50 -V	(1)
Porosidad, η	0.5796	(1)
Tortuosidad, τ	2.5	(5)
Permeabilidad hidráulica, κ'_h	$6.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2$	(3)
Potencial zeta, ζ	$-1.538 \times 10^{-2} \text{ -V}$	(4)
Permitividad eléctrica de la solución, ϵ	$7 \times 10^{-10} \text{ -F/m}$	(3)
Viscosidad de la solución, μ	10^{-3} Pa--s	(3)
Permeabilidad hidráulica efectiva, κ_h	$10^{-10} \text{ m}^2/(\text{Pa--s})$	(3)
Permeabilidad electroosmótica efectiva, κ_e	$-2.4 \times 10^{-9} \text{ m-(V--s)}$	(3)
Conductividad eléctrica del suelo, σ_s	$4.2 \times 10^{-10} \text{ S.m}$	(7)
Coefficiente de difusión del Cu^{+2} , D	$10^{-9} \text{ -m}^2/\text{s}$	(2)
Diferencia de presión entre electrodos (ánodo cátodo)	$1 \times 10^5 \text{ Pa}$	(6)

(1) Diseñado para este trabajo

(2) Vanýsek (1993)

(3) Jacobs et al. (1996)

(4) Determinado experimentalmente (Zetta-Meter 3.0)

(5) Valor seleccionado para lograr un ajuste razonable con los datos experimentales

(6) Valor seleccionado arbitrariamente para producir un movimiento en el agua de lavado

(7) Fuster M. et al, (1975)

4.2.1 Análisis de malla.

Previo a las simulaciones, se realizó un estudio de independencia de la malla computacional. El objetivo de dicho estudio es determinar el tamaño de los elementos finitos a partir de los cuales los resultados arrojados por el modelo computacional se vuelven independientes del tamaño de dichos elementos. Lo anterior garantiza que los resultados obtenidos por el modelo computacional representan la solución de las ecuaciones de cambio planteadas en el modelo y no el efecto de factores numéricos artificiales introducidos por la discretización de las ecuaciones.

La figura 31 muestra las líneas de las cinco mallas de 1236, 1897, 2575, 3690 y 4459 nodos con las cuales se realizaron las simulaciones bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de cobre de 100 mg/L, voltaje aplicado de 20 V y tiempo de simulación de 96 horas. Cada malla se utilizó para resolver el modelo computacional en términos de área limpia (Ec. 5.4) para tiempos de 0, 24, 48, 72 y 96 horas, de la siguiente manera:

Los resultados obtenidos para el área limpia, coincidieron aceptablemente para las mallas con 2575, 3690 y 4459 nodos. La malla seleccionada para realizar las simulaciones fue de 3690 nodos bajo el siguiente criterio.

Se definió la variación promedio de dos resultados para las cinco diferentes resoluciones de malla obtenidos en función de tiempos de 72 y 96 horas como sigue.

$$\frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(96) - f(72)}{96 - 72} \quad (4.5)$$

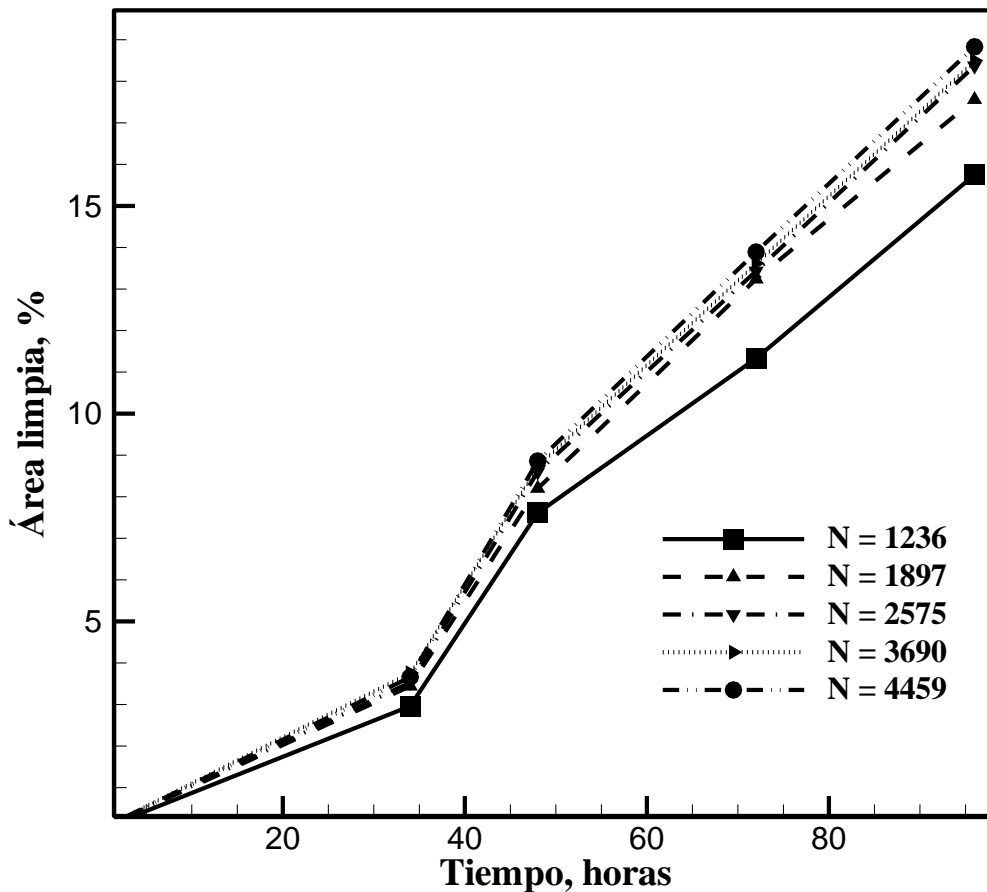


Figura 31. Resultados del modelo matemático para cinco mallas computacionales. Las condiciones experimentales: 20 V., Concentración inicial de cobre total 100 mg/L, y tiempo total de simulación 96 horas.

donde: $\Delta f(x)/\Delta x$ es la variación promedio de cada una de las líneas de la figura 30, para los valores en el eje de las abscisas de 72 y 96 horas; dichos valores fueron seleccionados debido a que son el penúltimo y último período de tiempo para cada simulación. Con los valores de las variaciones promedio, se determinaron las rectas que se muestran en la figura 32. Con sus pendientes y ordenada del origen, se determinó la resolución de malla óptima para obtener los resultados del modelo matemático.

En la figura 32 se observa que a simple vista las rectas que representan las mallas de 1236 (■) y 1897 (▲) nodos quedan descartadas, ya que sus ordenadas del origen son: -1.90 y 0.29 y sus pendientes son 0.1838 y 0.1799 respectivamente. Lo anterior indica que existe una separación entre ambas de aproximadamente 2.19 puntos porcentuales de área limpia a tiempo = 0. Por otra parte, la diferencia entre sus inclinaciones es de 0.0089. Es decir, son casi paralelas. Por otra parte, las rectas que representan las mallas de 2575 (▼) con una ordenada en el origen de -1.41 y una pendiente de 0.2061, es la más separada de las tres más contiguas. Las rectas que representan las mallas de 3690 (►) y 4459 (●) nodos

con valores de ordenadas del origen de -1.01 y -0.94; y pendientes de 0.2032 y 0.2059 respectivamente. Son las más cercanas entre sí, debido a que la diferencia entre sus ordenadas en el origen es de 0.07 y la diferencia entre sus pendientes es de 0.0027. Por lo que, de acuerdo con las comparaciones entre dichas rectas y el tiempo de cómputo similar, se seleccionó la malla de 3690 nodos y se utilizó para todos los cálculos posteriores. La malla resultante se muestra en la figura 33.

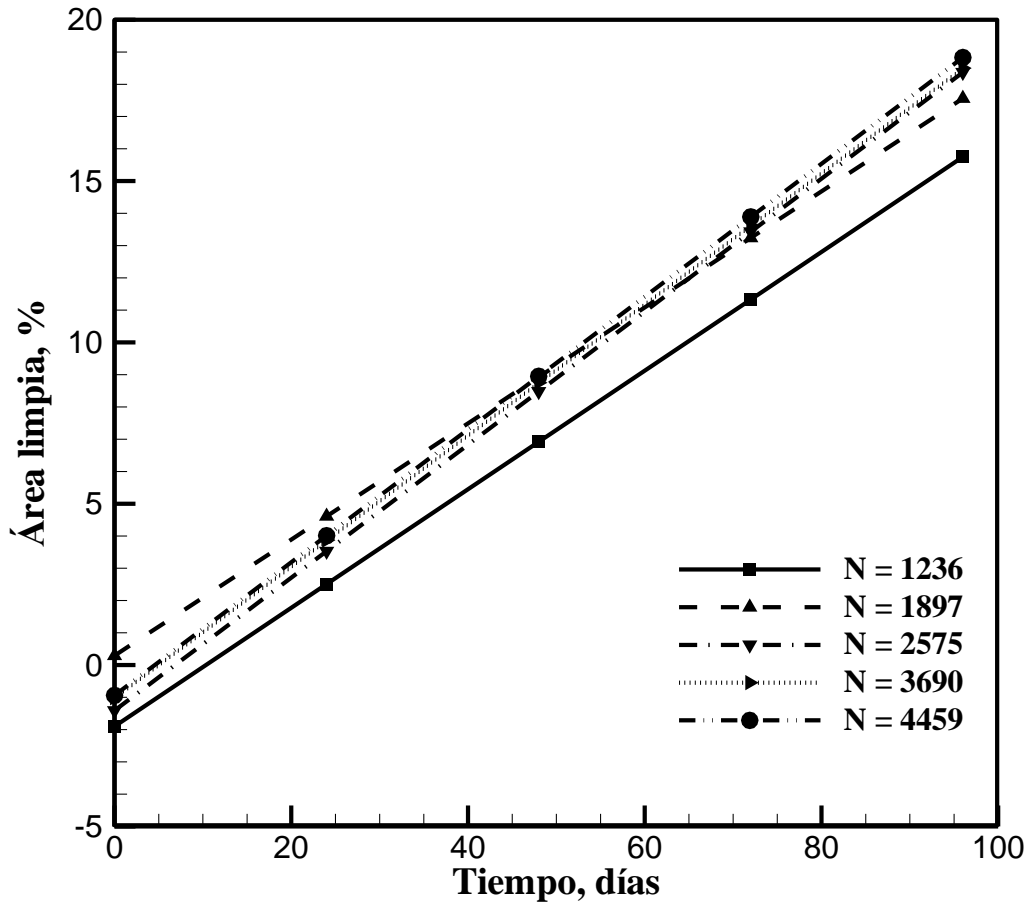


Figura 32. Rectas secantes obtenidas a partir de las variaciones promedio de los resultados de las cinco mallas computacionales.

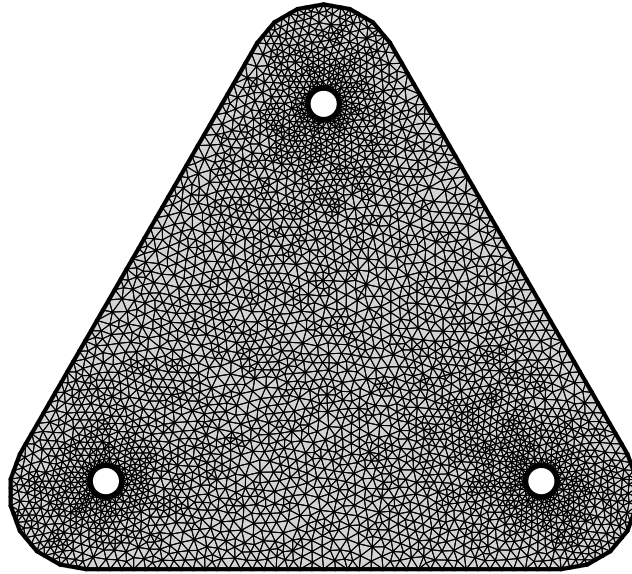


Figura 33. Malla computacional de 3690 nodos utilizada en la evaluación global del proceso de eliminación electrocinética de cobre en dos dimensiones.

4.2.2 Validación del modelo matemático.

Para realizar las comparaciones se seleccionaron dos casos: un primer caso, consideró una concentración inicial de Cu total en solución de 100 mg/L y una diferencia de potencial eléctrico aplicado entre electrodos de 20 V y un segundo caso, el cual consistió de una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L y una diferencia de potencial eléctrico aplicado entre electrodos de 50 V.

Los resultados del modelo fueron comparados con los datos experimentales de la siguiente manera: con la ayuda del software de visualización de datos Tecplot 360 ex 2015. Se obtuvieron las gráficas en dos dimensiones de los resultados del modelo y los datos experimentales. Al mismo tiempo, la figura 34 muestra un esquema que ilustra las comparaciones entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos (distancia ánodo – cátodo), una segunda comparación a lo largo de una línea de extracción entre los dos cátodos (distancia cátodo – cátodo) y finalmente una comparación a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera opuesta del sistema o pared opuesta de la celda a éste (distancia ánodo – pared).

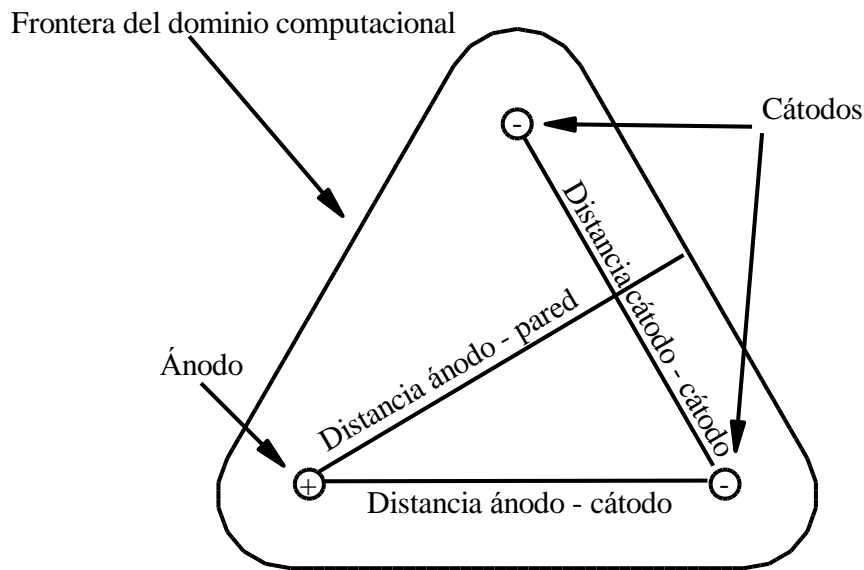


Figura 34. Esquema que representa las líneas de extracción de resultados y datos experimentales para su comparación.

4.2.2.1 Perfiles de voltaje, pH y concentración de cobre.

Se realizaron dos simulaciones para su verificación con concentraciones iniciales de Cu total en la solución de 100 mg/L y un voltaje aplicado entre electrodos de 20 V; 300 mg/L y un voltaje aplicados entre electrodos de 50 V. La verificación consistió en comparar los perfiles de voltaje aplicado entre electrodos, pH y concentración de Cu total en la fase acuosa, predichos por el modelo computacional con los datos experimentales obtenidos en este trabajo. Las comparaciones se realizaron a tiempos de 96 horas.

La figura 35 muestra la comparación entre los perfiles de voltaje predichos por el modelo matemático y voltaje experimental, para una concentración inicial de Cu total en solución de 100 mg/L, y una diferencia de potencial eléctrico aplicado entre el ánodo y los dos cátodos de 20 V. Ambos concuerdan razonablemente en términos de tendencia y simetría. Mientras que en el ánodo se observan valores entre 18.5 y 17.62 V de los resultados predichos por el modelo y los datos experimentales respectivamente, en los dos cátodos, los valores de voltaje son aproximadamente de 3 y 3.5 V entre los predichos por el modelo y los datos experimentales.

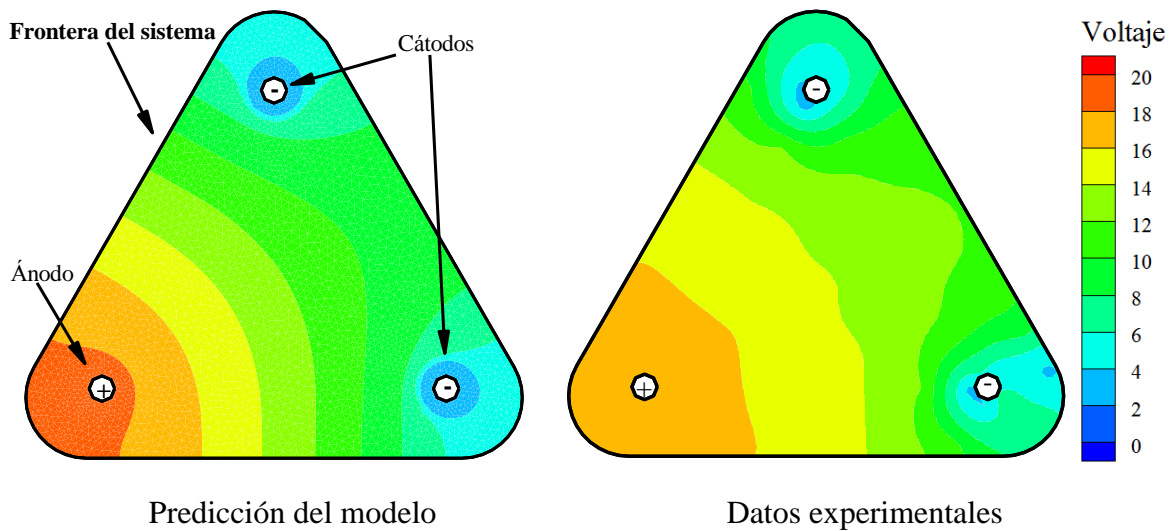


Figura 35. Comparación de los contornos de voltaje entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

La figura 36 muestra la distribución de los perfiles de pH en la solución predichos por el modelo matemático y aquellos obtenidos experimentalmente a 96 horas. Se observa una concordancia razonable en términos de tendencia y simetría; es decir, el modelo predice en las vecindades del ánodo, valores de pH menores a 2. Aunque en una región que es mucho más extensa, desde las vecindades del ánodo hasta las cercanías de los cátodos. En ese lugar, ocurre un salto brusco de pH de 3 a 13 hasta la pared de los cátodos. Por otra parte, los datos experimentales presentan valores de pH ligeramente menores a los predichos por el modelo matemático. En las vecindades del ánodo el pH tiene valores de 2, la región se extiende y se interna hasta la pared opuesta al ánodo; en las cercanías de los cátodos ocurre un aumento gradual de los valores de pH desde 2 a 11.

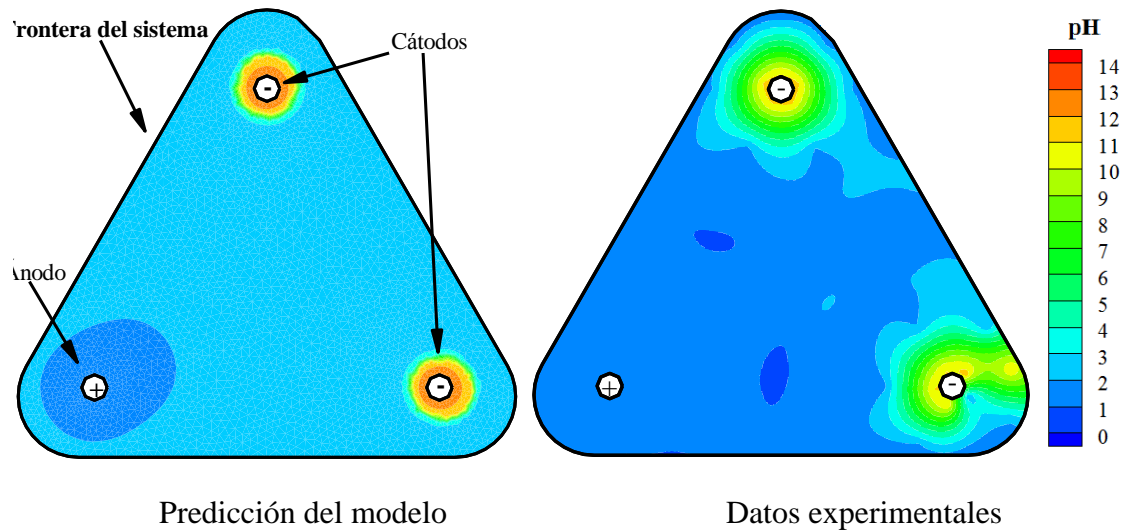


Figura 36. Comparación de los contornos de pH entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

En la figura 37 se comparan los contornos de Cu total en la solución entre las predicciones del modelo matemático y los datos experimentales. Se observa que el modelo predice razonablemente la disminución de concentración de Cu total en las vecindades de los cátodos; mientras que, en el ánodo, el modelo falla, ya que predice que una mayor cantidad de Cu se desplaza hacia los cátodos. En cambio, experimentalmente, el desplazamiento corre más lentamente, debido a que se forman tres regiones de baja concentración de Cu con valores de 60 mg/L, una se localiza en las vecindades del ánodo y las otras dos más pequeñas, se mueven hacia el centro de la celda pero en dirección del punto medio de la pared opuesta al ánodo.

La figura 38 muestra que para una concentración de 300 mg/L de Cu total en solución y un voltaje aplicado entre el ánodo y los dos cátodos de 50 V, la distribución de los perfiles

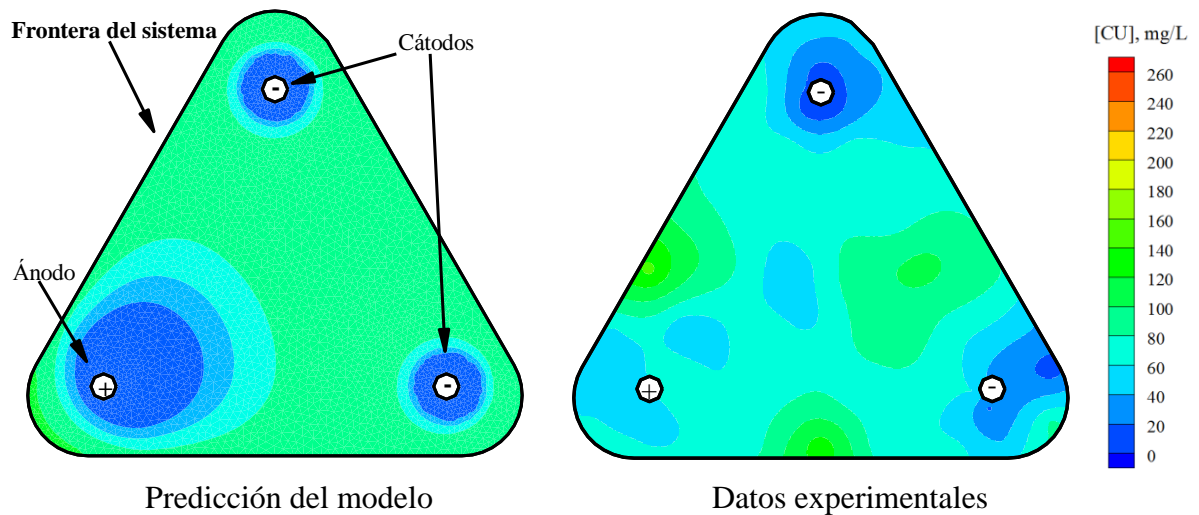


Figura 37. Comparación de los contornos de Cu total en solución entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V al término de 96 horas.

de voltaje predichos por el modelo matemático, no concuerdan razonablemente con los perfiles de voltaje experimentales en términos de tendencia. Es decir, mientras que en el ánodo se observan valores entre 45 y 46 V de los resultados predichos por el modelo y los datos experimentales respectivamente, en los dos cátodos, los valores de voltaje son aproximadamente de 3 y 27 V entre los predichos por el modelo y los datos experimentales.

La figura 39 muestra la distribución de los perfiles de pH en la solución predichos por el modelo matemático y los obtenidos experimentalmente a un tiempo de 96 horas. Cuando se comparan visualmente, se observa una concordancia razonable en términos de tendencia y simetría. El modelo predice en las vecindades del ánodo, una región que se extiende hacia el centro de la celda con valores de pH entre 1 y 2.

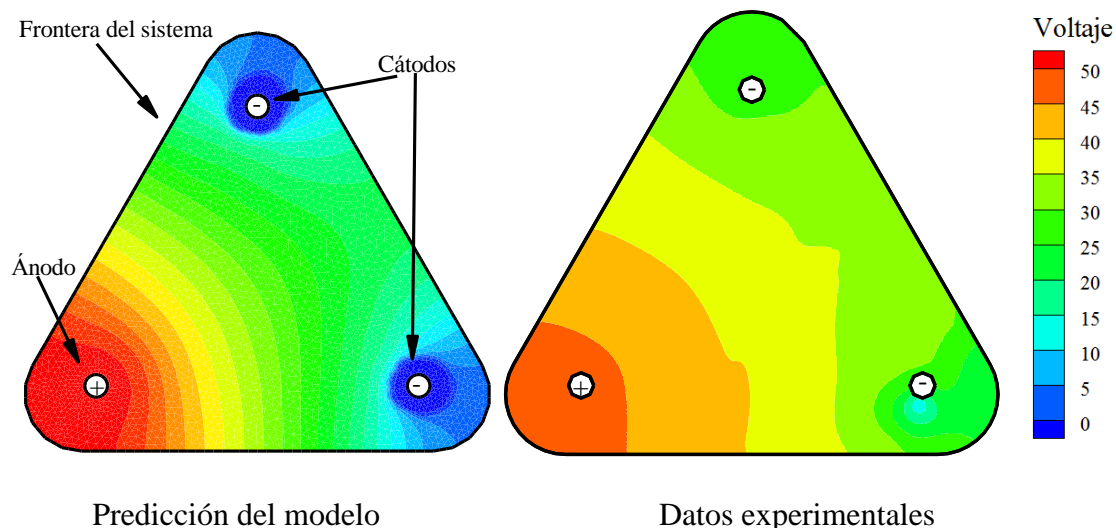


Figura 38. Comparación de los contornos de voltaje entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.

Después, la región que se localiza hacia el centro y entre de los dos cátodos es mucho más extensa, y se extiende hasta sus cercanías. Esta, muestran valores entre 2 y 3. En las vecindades de los cátodos, el modelo predice valores de pH igual a 12. Al mismo tiempo, los datos experimentales presentan valores de pH iguales a 2 en la región central media entre los dos cátodos. Mientras que, en las vecindades de los cátodos el valor de pH asciende gradualmente hasta 11.

Hasta este punto, las predicciones y los datos experimentales han concordado razonablemente; sin embargo, la figura 40 muestra que el modelo discrepa al predecir el comportamiento de la distribución de Cu total en solución, ya que el Cu se mueve más rápidamente de lo ocurre realmente bajo las condiciones de voltaje y concentración inicial definidos para este experimento.

Al término de las 96 horas, las predicciones muestran una baja concentración de Cu en las vecindades del ánodo, del orden de 2 mg/L. Hacia las vecindades de los cátodos la concentración disminuye a 0 mg/L. En la pared opuesta al cátodo y en las cercanías a los cátodos, el Cu se acumula y en esas regiones se aprecia una concentración de 120 mg/L.

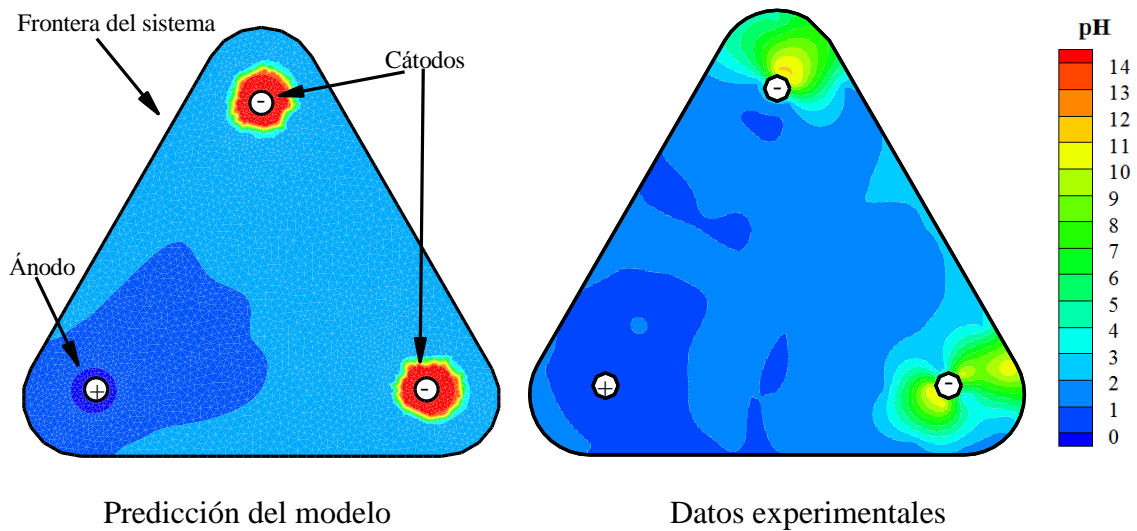


Figura 39. Comparación de los contornos de pH entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.

Sin embargo los perfiles de concentración de Cu experimentales, muestran que en realidad el Cu se mueve más lentamente. En las cercanías del ánodo, la concentración promedio de Cu es 120 mg/L, mientras que en los cátodos se observa una disminución en la concentración hasta 0 mg/L. Hacia la región comprendida entre los dos cátodos se observa una acumulación de la concentración de Cu de 480 mg/L.

4.2.2.2 Comparaciones a lo largo de las líneas ánodo-cátodo y ánodo-pared.

La figura 41 muestra en el eje de las abscisas, la distancia desde el ánodo hasta uno de los cátodos y en el eje de las ordenadas se muestra los valores de voltaje. Las comparaciones entre las predicciones (línea continua) y los datos experimentales (■) apoyan las observaciones hechas a partir de la figura 35.

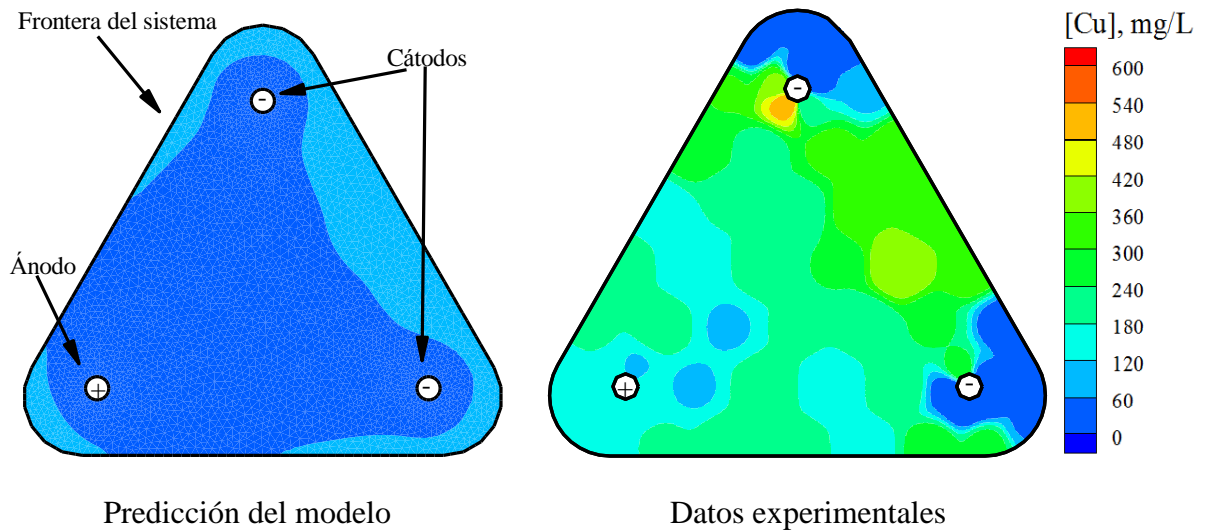


Figura 40. Comparación de los contornos de Cu total en la solución entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300 mg/L, y voltaje de 50 V al término de 96 horas.

A una distancia de 0 m, es decir en el ánodo, los valores de voltaje corresponden a los predichos por el modelo y los experimentales, 18.5 y 17.62 V respectivamente. Se observa además que la pendiente de las predicciones es más pronunciada comparada con la de los datos experimentales, lo que indica una menor conductividad eléctrica de la solución. A una distancia de 0.47 m, el modelo predice una caída pronunciada de voltaje, mientras que experimentalmente, la caída de voltaje y consecuentemente una caída en la conductividad eléctrica en la solución se aprecia a los 0.42 m.

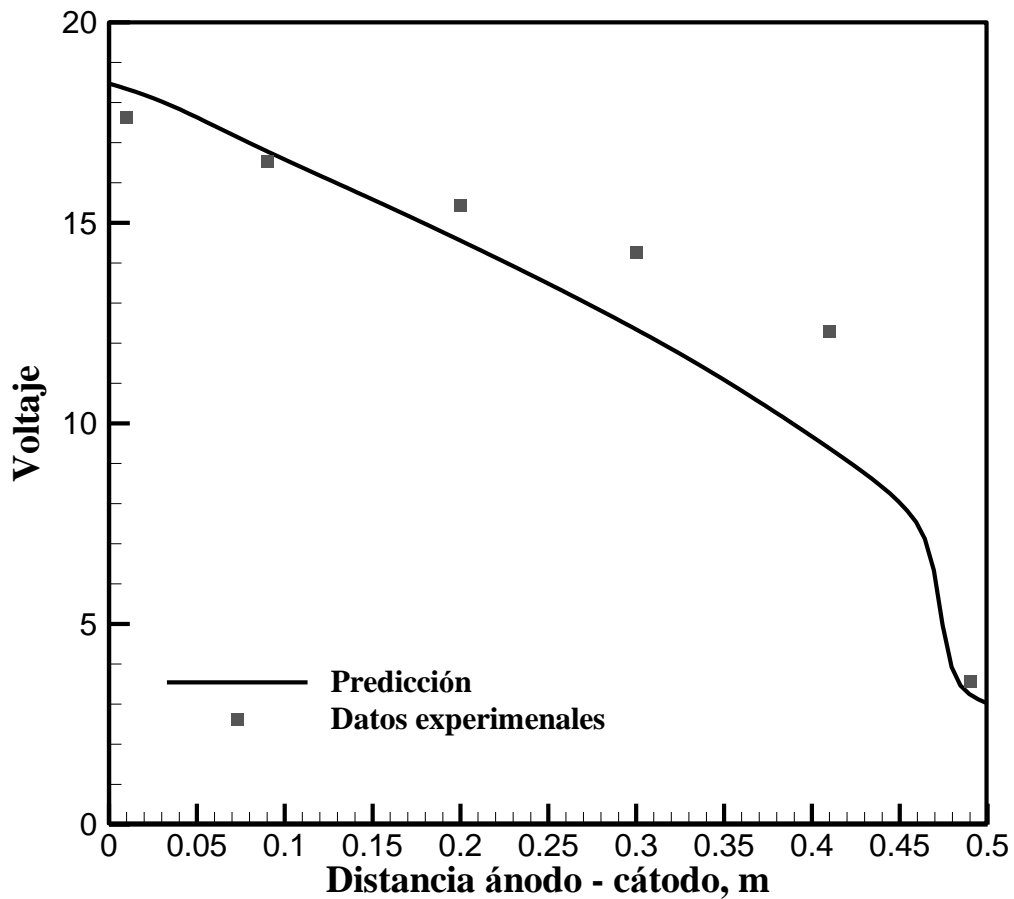


Figura 41. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de la línea ánodo-cátodo, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

Por otra parte, la figura 42 muestra la comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales en la dirección ánodo – pared. Las predicciones concuerdan en términos de tendencia. Aun cuando, solamente se pudieron obtener tres datos experimentales de voltaje, se observa que los datos experimentales se localizan por encima de la línea de predicción.

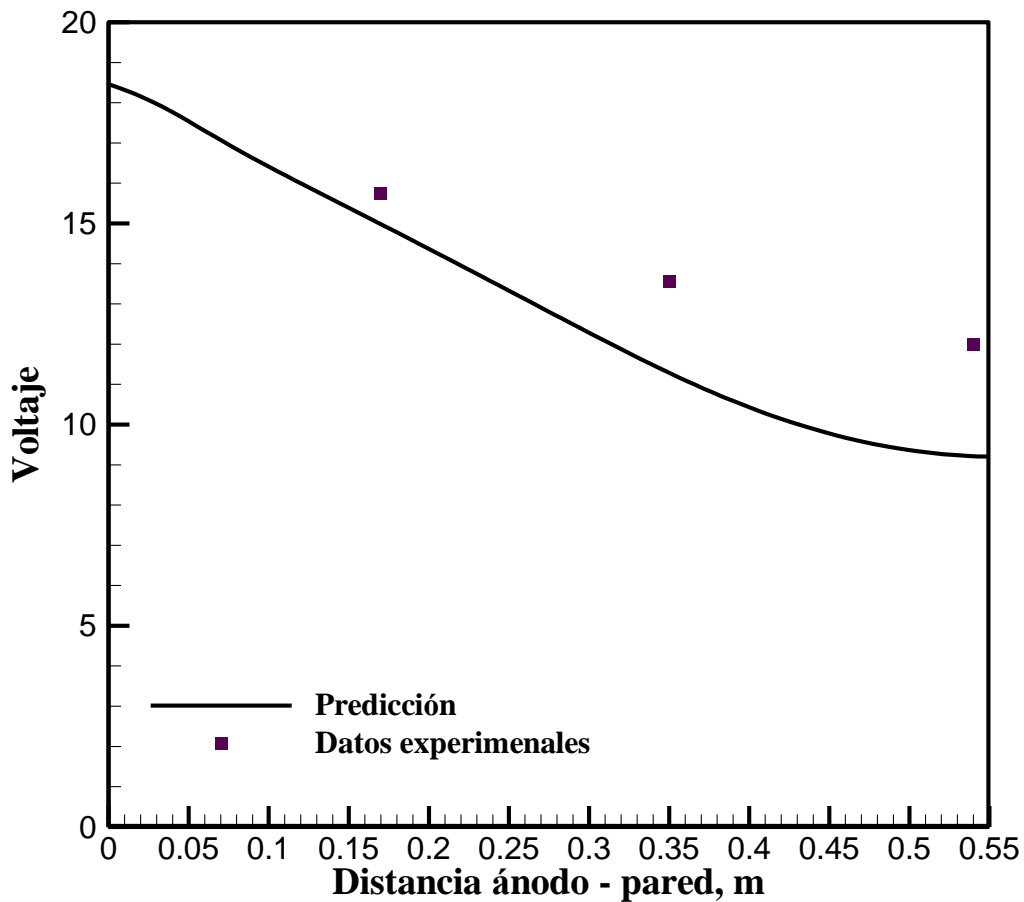


Figura 42. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

La figura 43 muestra en el eje de las abscisas, la distancia desde el ánodo hasta uno de los cátodos y en el eje de las ordenadas se muestra los valores de pH. Las comparaciones entre las predicciones y los datos experimentales, apoyan las observaciones hechas a partir de la figura 36. En la pared del ánodo, los resultados del modelo coinciden con el valor experimental de pH de 1.2. Hacia el cátodo, se observa que los valores calculados son mayores a los experimentales. Este comportamiento se conserva hasta una distancia de 0.41 m. En ese punto, hay un salto en los valores de pH predichos y experimentales hasta un valor de 12.5 y 10.5 respectivamente en la proximidad del cátodo.

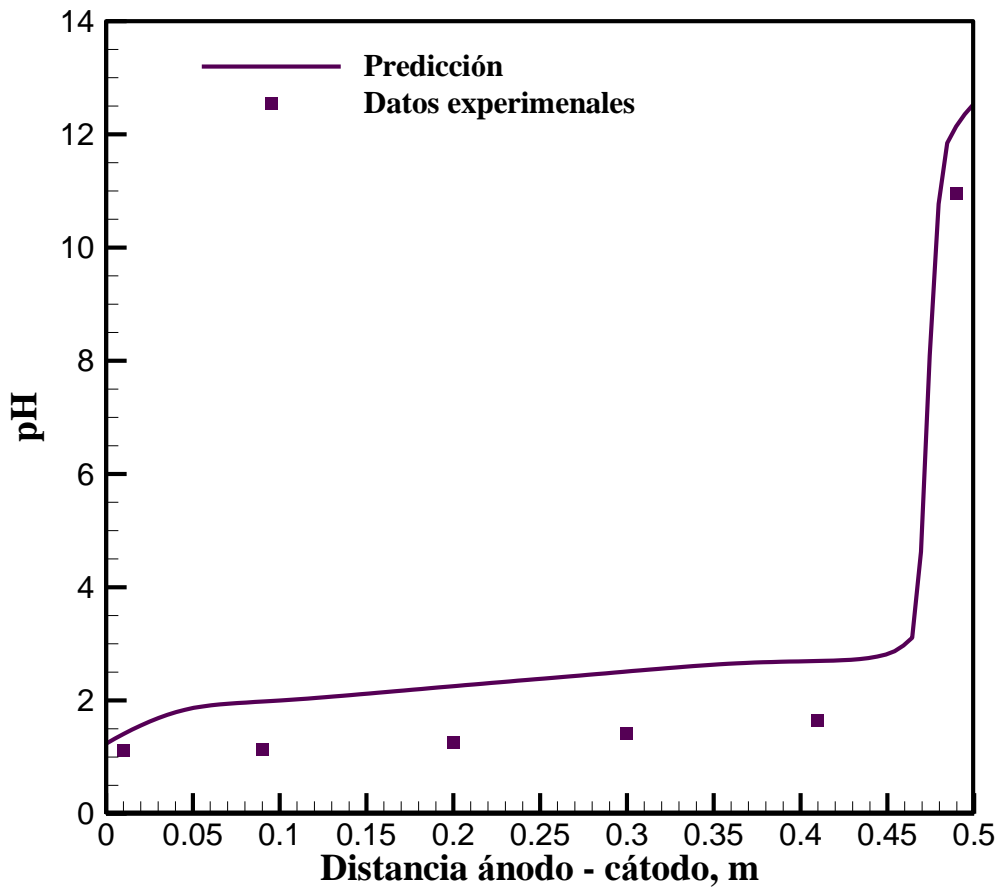


Figura 43. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

De igual manera, la figura 44 muestra que los valores predichos por el modelo (línea continua) y los datos experimentales (■), también concuerdan entre sí. Se aprecia que los valores más bajos de pH aparecen en las vecindades del ánodo y estos aumentan a lo largo de la distancia ánodo – pared hasta las cercanías de la pared opuesta al ánodo.

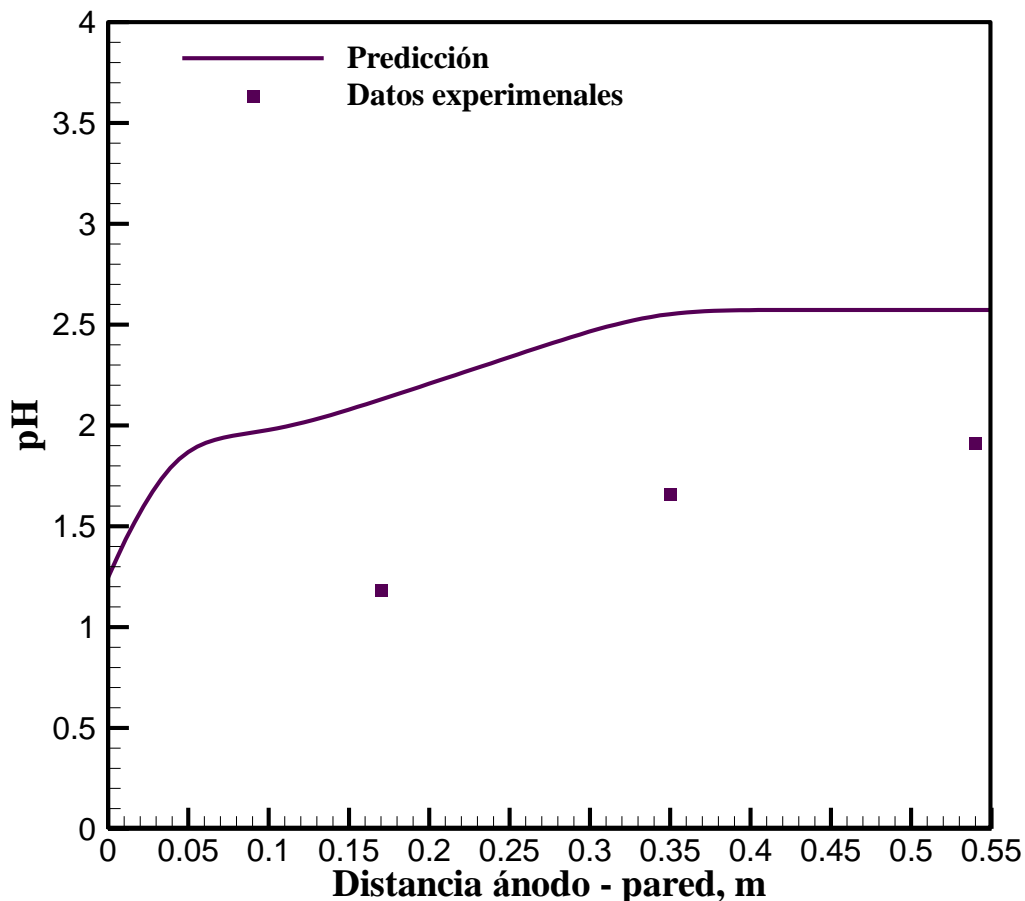


Figura 44. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

Los datos experimentales representados en la figura 45, sugieren que la concentración de cobre tiende a ser uniforme a lo largo de esta línea ánodo - cátodo, mientras que el modelo predice gradientes de concentración en varios puntos. Esta discrepancia se debe a que la capacidad buffer del medio poroso no es pequeña comparada con los iones hidrógeno generados en el ánodo y los iones hidroxilo generados en los cátodos. Por lo tanto, es necesario, para que el modelo prediga mejor el comportamiento del proceso de eliminación electrocinética de cobre en sílica gel; incluir al menos, la caracterización ácido - base de la sílica gel propuesta por DZenitis (63) y posteriormente incluirla en la rutina de equilibrio del modelo computacional (6).

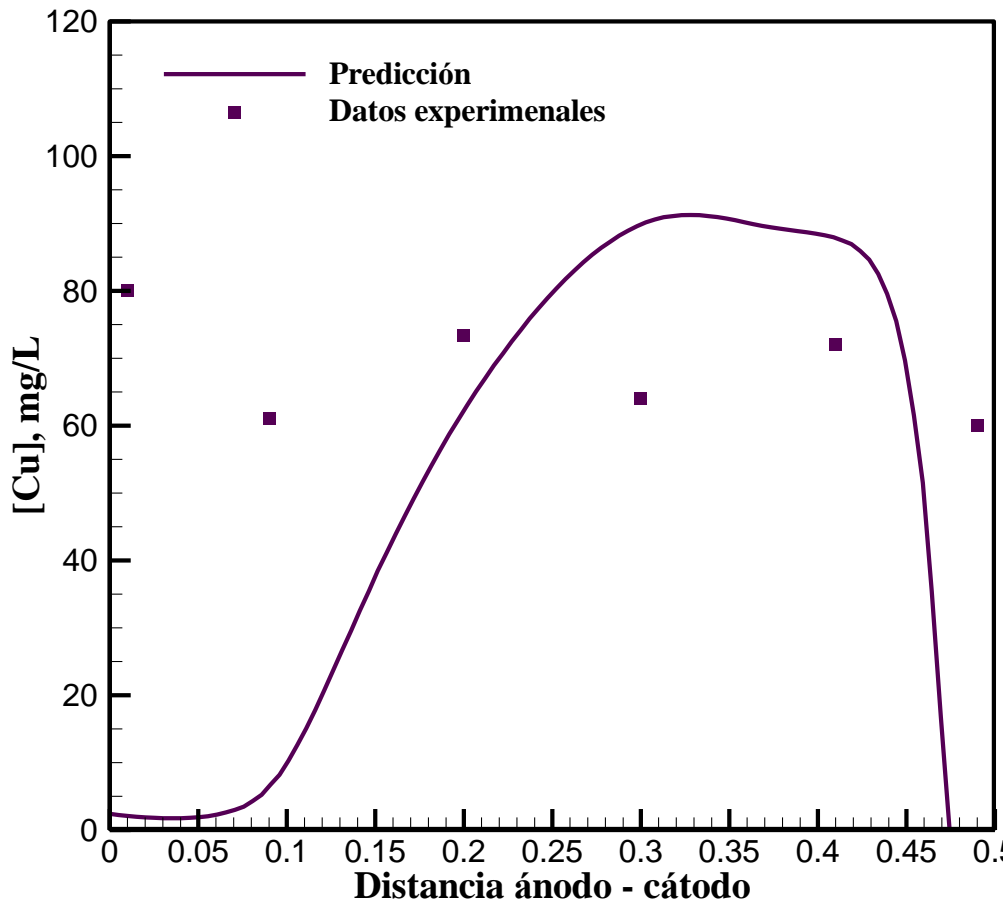


Figura 45. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

Al mismo tiempo, en la figura 46, las predicciones del modelo matemático concuerdan razonablemente con los datos experimentales, aun cuando solamente se tienen tres datos. Otros ejemplos con las comparaciones entre las predicciones del modelo matemático y los datos experimentales se hayan en el apéndice C.

En general, y bajo las condiciones bajo las cuales fueron realizadas las comparaciones entre los resultados del modelo matemático de Jacobs y Probstein (2) y los datos experimentales obtenidos en este trabajo. Las predicciones describen razonablemente el comportamiento del proceso de eliminación electrocinética de cobre de un medio poroso, bajo un arreglo triangular de electrodos.

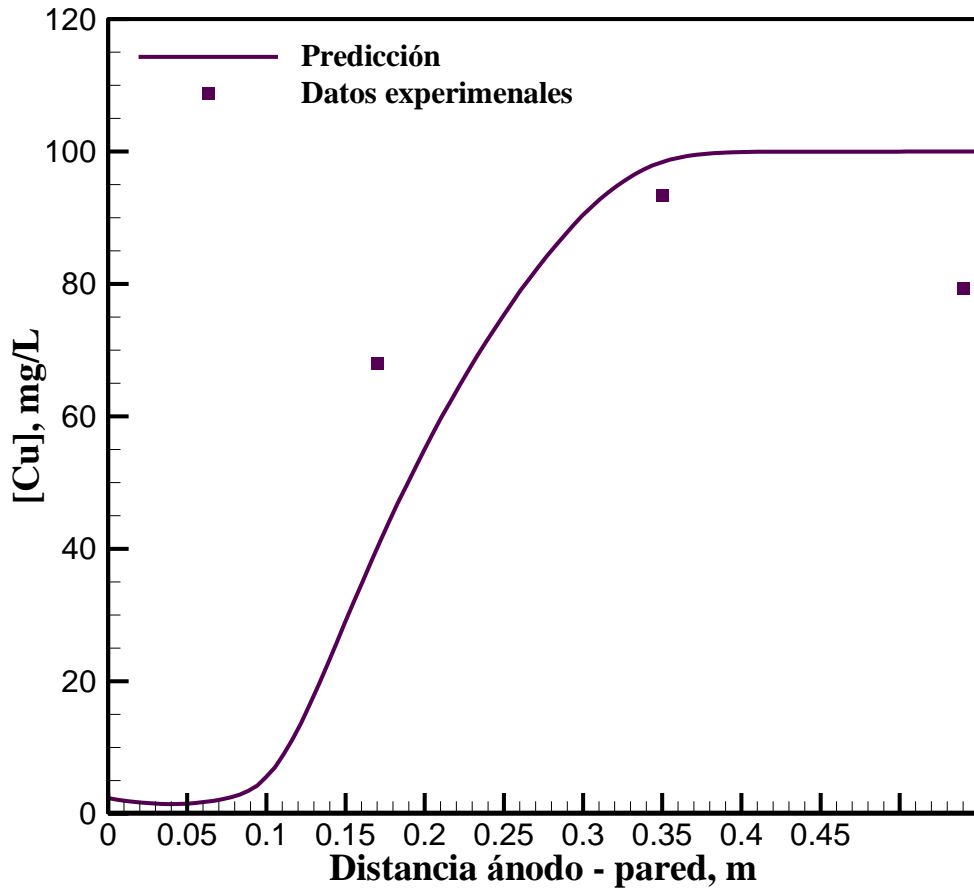


Figura 46. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100 mg/L, voltaje de 20 V, al término de 96 horas.

4.2.2.3 Errores entre resultados del modelo matemático y datos experimentales.

Con el fin de hacer una evaluación global de la validez del presente modelo, se establecieron las siguientes definiciones de error.

$$\text{Error máximo, \%} = \max \left(\frac{y_i^c - y_i^e}{y_i^e} \right) \times 100 \quad i = 1, n \quad (4.6)$$

$$\text{Error mínimo, \%} = \min \left(\frac{y_i^c - y_i^e}{y_i^e} \right) \times 100 \quad i = 1, n \quad (4.7)$$

$$\text{Error Promedio, \%} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i^c - y_i^e}{y_i^e} \right)}{n} \times 100 \quad (4.8)$$

donde y_i^c e y_i^e representan los valores calculado y experimental, respectivamente, en la i -ésima posición de muestreo al tiempo t , y $n = 57$ es el total de puntos de muestreo. Los valores de y_i^c e y_i^e representan alternativamente el voltaje, pH o concentración de cobre total. Para cada condición experimental, los errores definidos por las ecuaciones 4.6 a 4.8 son función del tiempo. Con el fin de obtener una estimación global acerca de su magnitud, se eligió como ejemplo el experimento realizado con 100 mg/L de cobre inicial y una aplicación de 20 V de diferencia de potencial eléctrico entre electrodos.

La figura 47 muestra los valores de error máximo, error promedio y error mínimo del modelo para los cálculos de voltaje. Los valores de error máximo, variaron en un intervalo de 37 a 47%. El valor máximo se obtuvo a $t = 0$ horas, mientras que el valor mínimo 24 horas después. A $t = 72$ horas el error ascendió a 56.% y a $t = 96$ horas, descendió a 56%. Los valores de error mínimo fueron determinados entre 0.1 y 8.1%. Se observa que a $t = 0$ horas, el valor fue máximo, a $t = 72$ horas, descendió hasta el valor mínimo y se incrementó a 1.5% a $t = 96$ horas.

El error promedio varió entre 19 y 33%. El valor máximo se obtuvo a $t = 0$ horas. A $t = 24$ horas el valor fue mínimo, a $t = 72$ horas, se aprecia un valor máximo de este error. Finalmente a $t = 96$ horas el error disminuyó a 19%. Se observa que la influencia del error máximo sobre el error promedio fue poco significativa, ya que el comportamiento del error promedio está más influenciado por los valores del error mínimo. Lo anterior, debido a que de los 57 errores calculados, solamente uno o dos valores de dicho error se incrementaron sustancialmente durante el transcurso de las 96 horas.

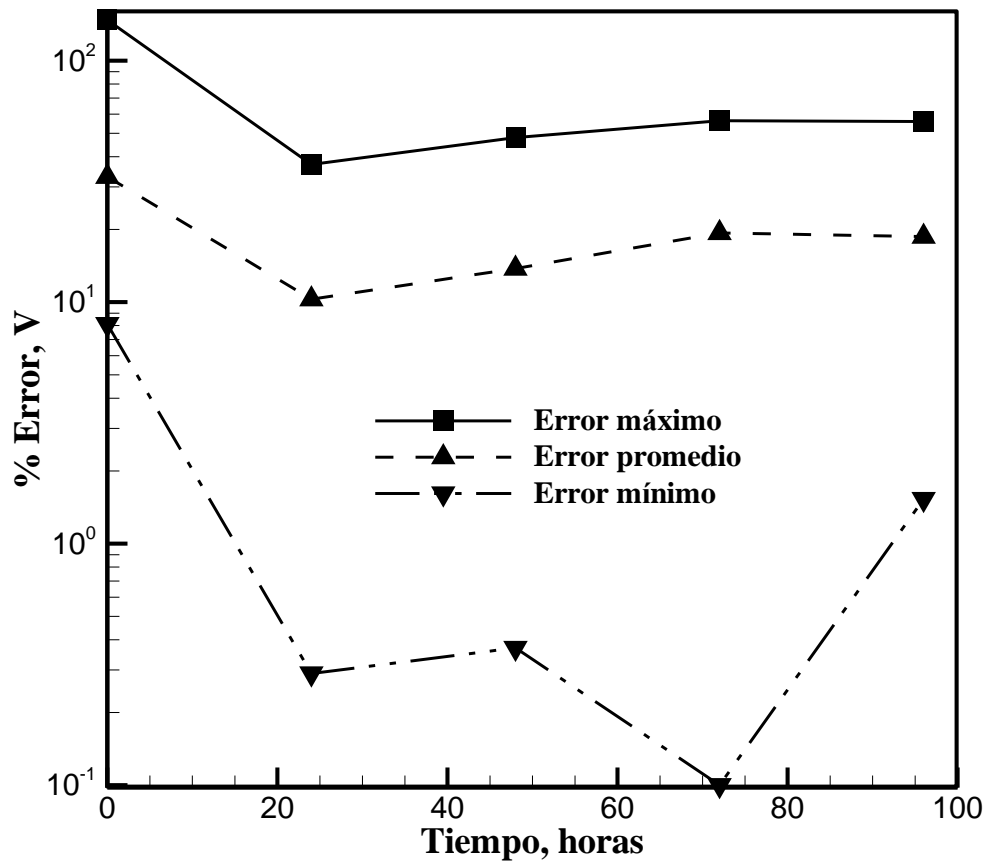


Figura 47. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo del voltaje. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V.

En la figura 48 se muestran los valores correspondientes de error para los cálculos de pH. El error máximo varió entre 44 y 510%. Aunque a $t = 0$ horas, el valor fue mínimo, este ascendió hasta su valor máximo a $t = 72$ horas. Finalmente a $t = 96$ horas el valor del error fue de 466%. Por otra parte, el error mínimo osciló entre 2 y 16%. A $t = 0$, el valor del error fue 16% a $t = 24$ horas descendió al valor mínimo. Finalmente, a $t = 96$ horas el valor fue 8%.

Asimismo, el comportamiento de los valores de error promedio, variaron de 32 a 52%. El valor mínimo se obtuvo a $t = 0$ horas y gradualmente el error creció hasta alcanzar su valor máximo a $t = 96$ horas.

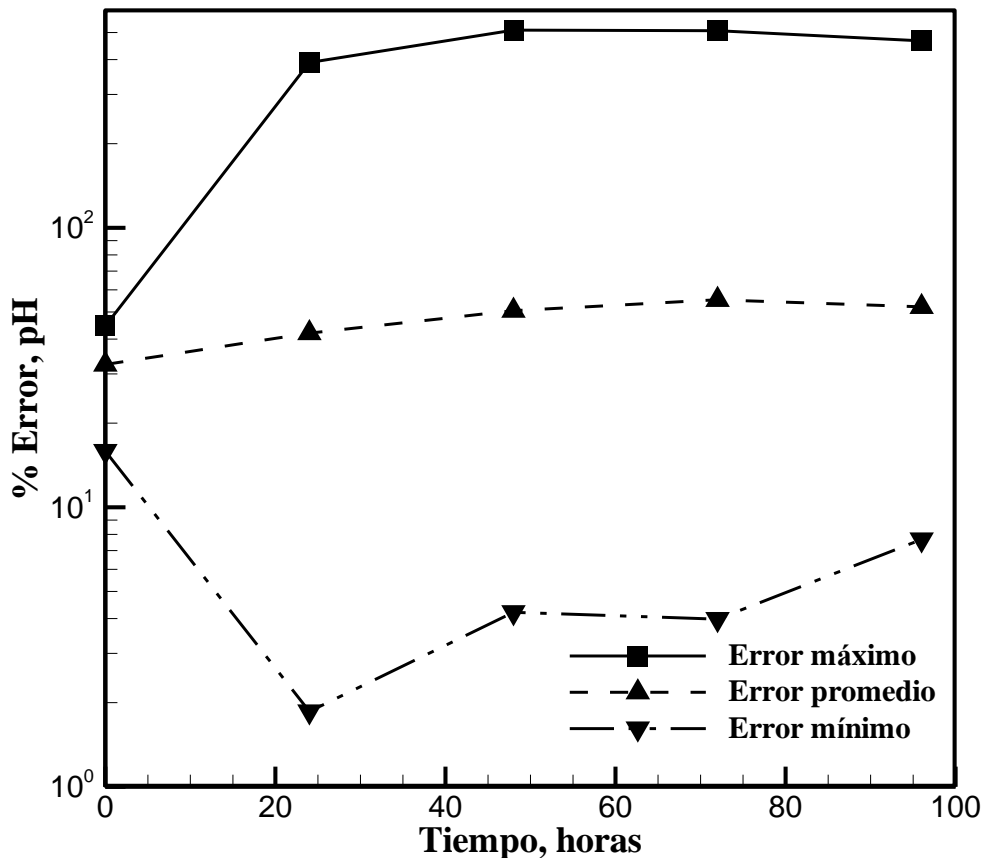


Figura 48. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo de pH. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V.

En la figura 49 se muestran los valores de error para los cálculos de Cu. Conforme transcurrió el tiempo, los valores del error máximo variaron entre 137 y 632%. A $t = 0$ horas, el valor fue de 422%, a $t = 48$ horas descendió al valor mínimo, para después ascender a $t = 96$ horas al valor máximo.

Por otra parte, el error mínimo fue de 0.9 a 4%. A $t = 0$ horas, el valor de este error fue máximo. Posteriormente, a $t = 72$ horas descendió a su valor mínimo. Finalmente a $t = 96$ horas, el error mínimo alcanzó un valor de 3%.

Finalmente se aprecia que los valores del error promedio variaron entre 48 y 71%. El error promedio aumentó de forma lineal desde su valor mínimo a $t = 0$ horas, hasta su valor máximo a $t = 96$ horas.

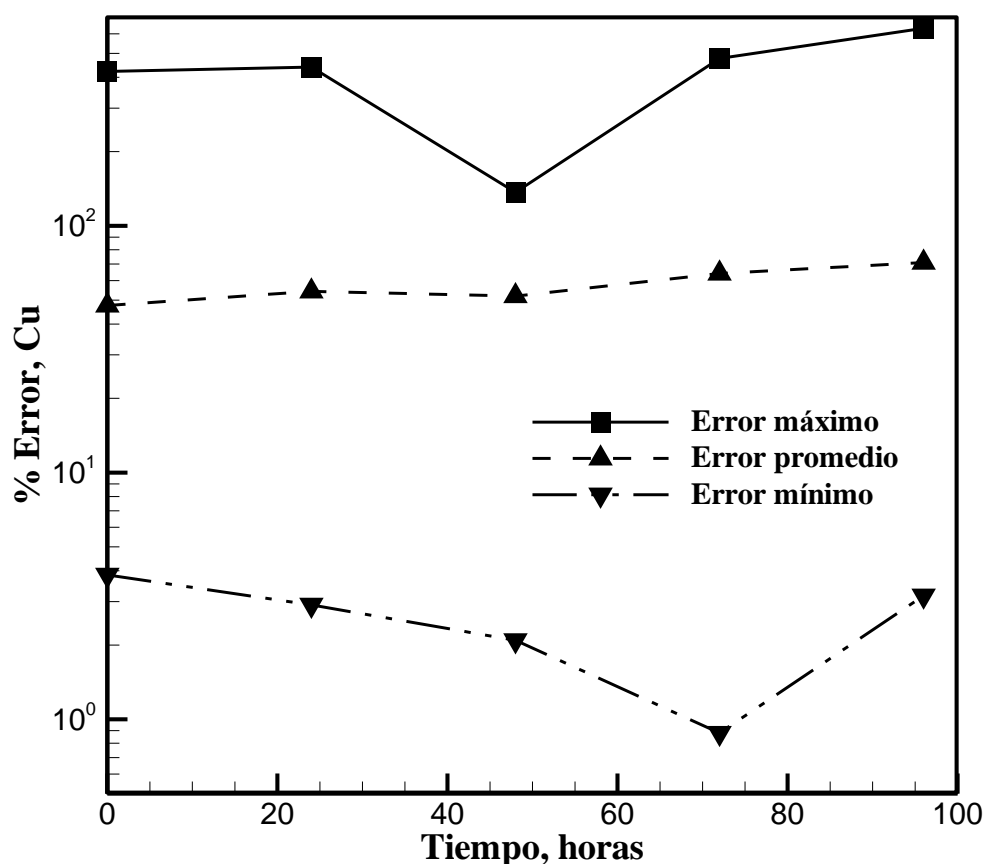


Figura 49. Evolución del error del modelo matemático para el cálculo de Cu. Condiciones experimentales: 100 mg/L de concentración de cobre inicial, voltaje aplicado entre electrodos de 20 V

El análisis de los porcentajes de error de las comparaciones durante las 96 horas del experimento, mostró que los errores promedio de voltaje, fue menor al 20%, del pH fue menor al 53% y el del Cu total en solución, fue menor al 71%. La discrepancia observada entre los valores calculados y los datos experimentales para la concentración de Cu y el pH son significativas a pesar de que en general se predicen razonablemente las tendencias del proceso, como se observa en las Figuras 35 a 40. Posibles causas asociadas a estos errores pueden ser las siguientes

En la rutina de equilibrio del modelo, no se consideraron las reacciones ácido - base del suelo, para evitar el salto brusco en los valores de pH en las cercanías de los cátodos. Lo que provoca grandes gradientes de concentración de Cu entre el ánodo y los cátodos.

La dificultad que representa el escalamiento de la celda experimental, ya que conforme se incrementa su tamaño, la anisotropía del medio poroso es más evidente. Específicamente, en lo referente a los valores pico de concentración inicial de Cu determinados experimentalmente.

El error entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales se puede minimizar si, el modelo computacional, incluyera en la rutina de entrada de datos, la distribución de concentración inicial experimental de Cu en solución. Y que se incorporen, las reacciones ácido – base del suelo en la rutina de equilibrio.

Finalmente, mientras que los resultados del modelo muestran que al aumentar la concentración inicial de Cu en la solución y el voltaje aplicado entre electrodos activos, el área limpia aumenta. Los datos experimentales demuestran que a mayor concentración inicial de cobre en la solución, menor será el porcentaje de área limpia alcanzado independientemente del voltaje aplicado.

Tabla 8. Comparación de las áreas limpias predichas por el modelo matemático y las obtenidas experimentalmente.

Concentración inicial, Cu, mg/L	Voltaje	Predicción, Área limpia, %	Experimental, Área limpia, %
100	20	19	17
100	50	20	47
300	20	34	2
300	50	95	7

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados del presente trabajo en base a los objetivos planteados, se pueden resumir de la siguiente manera:

- 1) Bajo las condiciones de experimentación utilizadas en el presente estudio, las partículas de sílica gel no mostraron capacidad de adsorción del cobre disuelto en la solución acuosa, por lo que se comportó como inerte para propósitos de la eliminación electrocinética.
- 2) Durante los experimentos, el voltaje inicial en las cercanías del ánodo fue máximo y descendió gradualmente con el tiempo. Al cabo de 96 horas, el voltaje máximo se extendió en dirección de los cátodos.
- 3) La concentración de cobre inicial presentó ligeras desviaciones de uniformidad en el medio poroso. Sin embargo, tales desviaciones no afectaron el comportamiento observado de los contornos de pH y potencial eléctrico durante los experimentos.
- 4) El valor del pH inicial fue de 2 en el medio poroso en todas las condiciones experimentales. La evolución de sus contornos presentó cambios drásticos en las vecindades de los cátodos, donde al cabo de 96 horas se formó una región fuertemente alcalina de $\text{pH} = 12$.
- 5) La experimentación mostró evidencia del efecto del campo eléctrico y el pH sobre las especies de cobre cargadas eléctricamente. Las especies catiónicas se desplazaron con el frente ácido hacia las vecindades de los cátodos. Las especies aniónicas se desplazaron con el frente básico hacia el ánodo. El encuentro de ambos frentes ocurrió en la periferia de los cátodos formando hidróxido cúprico sólido.
- 6) Para una concentración de cobre inicial determinada, el incremento de 20 a 50 V entre electrodos activos produjo una mayor velocidad de desplazamiento del frente ácido y el cobre en solución hacia los cátodos.
- 7) La máxima velocidad de desplazamiento de cobre se observó en los experimentos realizados con 300 mg/L de cobre inicial y 50V entre electrodos. En dichas condiciones, alrededor de los cátodos se observó una región equivalente al 7% del

área total de la celda, en cuyo interior la concentración de cobre fue menor o igual a 50 mg/L.

- 8) Los datos experimentales mostraron que la conductividad eléctrica de la solución acuosa y la movilidad del cobre disuelto aumentaron al incrementarse el potencial eléctrico aplicado entre los electrodos activos y la concentración inicial de cobre en el medio poroso.
- 9) Los contornos de voltaje, pH y concentración de cobre en solución mostraron un comportamiento simétrico en la celda experimental, lo que es congruente con el arreglo de electrodos utilizados y el carácter isotrópico del medio poroso.
- 10) Durante el tiempo de duración de los experimentos no se observó evidencia de haber alcanzado el régimen estacionario en el medio poroso.
- 11) El porcentaje de área limpia obtenida en los experimentos fue directamente proporcional al voltaje aplicado entre electrodos e inversamente proporcional a la concentración inicial de cobre en el medio poroso.
- 12) Los efectos del voltaje aplicado entre electrodos y la concentración inicial de cobre sobre el porcentaje de área limpia obtenida en los experimentos dependieron del valor de ambos factores, por lo que existe interacción entre ellos.
- 13) Se adaptó un modelo computacional de la literatura para predecir el comportamiento de la eliminación electrocinética de especies de cobre en un arreglo bidimensional a nivel laboratorio.
- 14) Las predicciones del modelo matemático concordaron razonablemente con los datos experimentales en términos de voltaje, pH y concentración de cobre total. Para casos seleccionados, los errores promedios de voltaje, pH y concentración de Cu total, fueron de 10.3 a 33%, 55.3 a 32.4% y 47.6 a 71.0% respectivamente.
- 15) Las mayores discrepancias entre las predicciones del modelo y datos experimentales se observaron cuando la concentración inicial de cobre fue de 300 mg/L y 50 V aplicado entre electrodos. Esto se atribuyó a la sobreestimación del mecanismo de transporte de electromigración, además que el modelo no incluye las reacciones ácido-base del medio poroso.

Para trabajos futuros en esta área, se hacen las siguientes recomendaciones:

- 1) Incrementar el tiempo de cada experimento, hasta alcanzar el equilibrio, para obtener una mayor cantidad de datos para validar el modelo computacional.
- 2) Añadir a la rutina de equilibrio del modelo matemático las reacciones ácido – base del medio poroso para predecir gradientes menos pronunciados de pH y cobre.
- 3) Extender el modelo matemático para considerar la presencia de otras especies químicas disueltas en el agua, en el suelo, tales como dióxido de carbono y cloruros que pueden afectar al comportamiento del sistema.

Referencias bibliográficas

1. Sims R. Contaminated Surface Soils In-place Treatment Techniques. Noyes Publications Ed. 1986;New Jersey, U. S. A.:pp. 4, 5, 6.
2. Jacobs RA, Probststein RF. Two-dimensional modeling of electroremediation. Aiche Journal. 1996;42(6):1685-96.
3. Hicks RE, Tondorf S. Electrorestoration of Metal-Contaminated Soils. Environmental Science & Technology. 1994;28(12):2203-10.
4. Wong JSH, Hicks RE, Probststein RF. EDTA-enhanced electroremediation of metal-contaminated soils. Journal of Hazardous Materials. 1997;55(1-3):61-79.
5. Lageman R. Electroreclamation. Environmental Science & Technology. 1993;27(13):2648-50.
6. Jacobs RA. Two-dimensional modeling of cocontaminants from soils by electric fields [PHD]: Massachusetts Institute of Technology; 1995.
7. Choi YS, Lui R. A Mathematical-Model for the Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil. Journal of Hazardous Materials. 1995;44(1):61-75.
8. Page MM, Page CL. Electroremediation of contaminated soils. Journal of Environmental Engineering-Asce. 2002;128(3):208-19.
9. Alshawabkeh AN, Acar YB. Electrokinetic remediation .2. Theoretical model. Journal of Geotechnical Engineering-Asce. 1996;122(3):186-96.
10. Hamed J, Acar YB, Gale RJ. Pb(II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics. Journal of Geotechnical Engineering-Asce. 1991;117(2):241-71.
11. Runnells DD, Wahli C. Insitu Electromigration as a Method for Removing Sulfate, Metals, and Other Contaminants from Ground-Water. Ground Water Monitoring and Remediation. 1993;13(1):121-9.
12. Shapiro AP, Renaud PC, Probststein RF. Preliminary Studies on the Removal of Chemical-Species from Saturated Porous-Media by Electroosmosis. Physicochemical Hydrodynamics. 1989;11(5-6):785-802.
13. Denisov G, Hicks RE, Probststein R, F. On the kinetics of changed contaminant removal from soils using electric fields. Journal of the colloid and interface science. 1996;178:309-23.
14. Jacobs, A R, inventors Removal of Contaminant Materials from Soils Site. U. S. A. 1995.
15. Gómez Á, Agustín, Santillón M. Estudio preliminar de la calidad del agua en la cuenca hidrológica del río San Pedro, Sonora. Bol Depto de Geología, Unison. 1994;11, No. 2:13-30.
16. Moreno SA. Restauración por electroadsorción de suelos contaminados. Hermosillo: Universidad de Sonora; 1999.
17. Thomas H. Record of Decision - Cherokee County. E. P. A.; 1998.
18. Acar Y, B., Akram, N. Alshawabkeh, Robert, J. Gale. FUNDAMENTALS OF EXTRACTING SPECIES FROM SOILS BY ELECTROKINETICS. Waste management. 1993;13:141-51.

19. Shapiro AP, Probstein RF. Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. *Environmental Science & Technology*. 1993;27(2):283-91.
20. Al-Hamdan A, Reddy K. Surface speciation modeling of heavy metals in kaolin: Implications for electrokinetic soil remediation processes. *Adsorption-Journal of the International Adsorption Society*. 2005;11(5-6):529-46.
21. Teutli-Leon M, Oropeza M, Gonzalez I, Soria A. Mathematical Modeling of a galvanostatic soil electroremediation process. *Aiche Journal*. 2005;51(6):1822-33.
22. Probstein RF, Hicks RE. Removal of Contaminants from Soils by Electric-Fields. *Science*. 1993;260(5107):498-503.
23. Schwartz DT, Buehler MF, Christiansen DX, Davis EJ. In-situ monitoring of electrochemical transport processes in Hanford Grout Vault Soil. *Journal of Hazardous Materials*. 1997;55(1-3):23-37.
24. Banerjee S. Electro-decontamination of chrome-contaminated Soils. Symp tAR, editor. Cincinnati: Environmental Protection Agency; 1987.
25. Lageman R, Pool W, Seffinga G. Electro-Reclamation - Theory and Practice. *Chemistry & Industry*. 1989(18):585-90.
26. Pamukcu SaW, J. K. Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil. *Environ Prog*. 1992;11(3):241-50.
27. Pamukcu SaW, J. K. Electrokinetically enhanced in situ soil decontamination. In: eds MD, editor. *Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils*. New York: D. L. Wise and D. J. Trantolo; 1994. p. 248-98.
28. Lageman R, Pool, W., and Seffinga, G. A. Electro-reclamation: State-of-the-art and future devolpment. In: Kluwer AD, editor. *Contaminated soil' 90*. Netherlands: F. Arendt, M. Himsenveld and W. J. Van den Brink; 1990. p. 1071-8.
29. Bruell CJ, Segall BA, Walsh MT. Electroosmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and Tce from Clay. *Journal of Environmental Engineering-Asce*. 1992;118(1):68-83.
30. Acar YB, Alshawabkeh AN. Electroosmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and Tce from Clay - Discussion. *Journal of Environmental Engineering-Asce*. 1993;119(2):404-6.
31. Ho SV, Sheridan PW, Athmer CJ, Heitkamp MA, Brackin JM, Weber D, et al. Integrated in-Situ Soil Remediation Technology - the Lasagna Process. *Environmental Science & Technology*. 1995;29(10):2528-34.
32. Mitchell JK. Conduction Phenomena - from Theory to Geotechnical Practice. *Geotechnique*. 1991;41(3):299-340.
33. Kuo CC, Papadopoulos KD. Electrokinetic: Movement of settled spherical particles in fine capillaries. *Environmental Science & Technology*. 1996;30(4):1176-9.
34. DeFlaun MF, Condee CW. Electrokinetic transport of bacteria. *Journal of Hazardous Materials*. 1997;55(1-3):263-77.
35. Yeh GT, Tripathi VS. A Model for Simulating Transport of Reactive Multispecies Components - Model Development and Demonstration. *Water Resources Research*. 1991;27(12):3075-94.

36. Probstein RF, Renaud PC, Shapiro AP. Electroosmosis Techniques for Removing Materials from Soil. Technologies. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991 Dec. 24, 1991. Report No.: 5,074,986.
37. JACOBS R, SENGUN M, HICKS R, PROBSTEIN R. MODEL AND EXPERIMENTS ON SOIL REMEDIATION BY ELECTRIC-FIELDS. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Environmental Science and Engineering & Toxic and Hazardous Substance Control*. 1994;29(9):1933-55.
38. Shiba S, Hirata Y, Seno T. Mathematical model for hydraulically aided electrokinetic remediation of aquifer and removal of nonanionic copper. *Engineering Geology*. 2005;77(3-4):305-15.
39. Jacobs RA, Sengun MZ, Hicks RE, Probstein RF. Model and Experiments on Soil Remediation by Electric-Fields. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Environmental Science and Engineering & Toxic and Hazardous Substance Control*. 1994;29(9):1933-55.
40. Reed BE, Berg MT, Thompson JC, Hatfield JH. Chemical Conditioning of Electrode Reservoirs During Electrokinetic Soil Flushing of Pb-Contaminated Silt Loam. *Journal of Environmental Engineering-Asce*. 1995;121(11):805-15.
41. Eykholt GR. Development of pore pressures by nonuniform electroosmosis in clays. *Journal of Hazardous Materials*. 1997;55(1-3):171-86.
42. Rubio N, Virgilio, Pèrez T, Manuel, Herrera U, Ronaldo., Jacobs R, A. Two-Dimensional Computational Modeling of the Electrokinetic Remediation of a copper-Contaminated Soil Part I: Model Validation. *Dyna*. 2014.
43. Rubio N, Virgilio, Pérez T, Manuel, Jacobs R, A, Herrera Urbina R. TWO-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL MODELING OF THE ELECTROKINETIC REMEDIATION OF A COOPER-CONTAMINATED SOIL PART II: SENSITIVITY ANALYSIS FOR A TRIANGULAR SOIL FIELD. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2014.
44. Rubio N, Virgilio, Pèrez T, Manuel, Herrera U, Ronaldo., Jacobs R, A. Two-Dimensional Computational Modeling of the Electrokinetic Remediation of a copper-Contaminated Soil Part I: Model Validation. *Dyna*. 2013.
45. Báez Q, Carlos A, Sáenz G, Carolina, Rodríguez NG. Estudio de las condiciones de reacción para la obtención de sílica gel absorbente (SGA). Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2007.
46. Juarez **B, Eulalio, Rico R, Alfonso**. Mecánica de suelos. México D. F.: Ed. Limusa; 1996.
47. Lambe TW, Robert VW. Mecánica de suelos. México D. F.: Limusa; 2010. p. 582.
48. Merlin GS, Richard LH. Soil engineering. New York USA: Harper and Row; 1982. p. 819.
49. Montoro MA, Francisca F. PERMEABILIDAD INTRÍNSECA DE SUELOS ARENOSOS CON PRESENCIA DE PARTÍCULAS DE LIMO Y ARCILLA. Argentina: Universidad Nacional de Cordova; 2011.
50. Green DW, Malone JO, editors. Perry's Chemical Engineers' handbook. Library of Congress U. S. A.: McGraw Hill; 1984.

51. Mackelvey JP, Grotch H. Physics for Science and engineering. First edition ed. Pennsylvania, U. S. A: Harper and Row Publishers, Inc; 1978.
52. Adamson AW. Physical Chemistry of Surfaces. John Wiley & sons I, editor. United States of america 1976.
53. Carnahan B, Luther HA, Wilkes JO. Applied Numerical Methods. John Wiley & Sons I, editor 1969.
54. N. BJ, R. CD. Ionic Equilibrium Solubility and pH Calculations. U. S. A.: John Wiley & sons, inc; 1998. 559 p.
55. Fuerstenau MC. Flotation. Memorial AMG, editor. New York, U. S. A.: American Institute of Metalurgical and Petroleum Engineers Inc.; 1976.
56. HSC Chemistry for Windows versión 5.0 Finland 1999 [Available from: www.outocumpu.com.
57. inc. T. Tecplot 360, R 2011. Bellevue, WA 98006 2011.
58. Vanysek P. Ionic Conductivity and Difussion at Infinite Dilution. D. R. Lide E, editor. Boca Raton FL 1993.
59. Narasimhan B, R. SR. Electrokinetic barrier to prevent subsurface contaminante migration: theoretical model development and validation. Journal of contaminante hydrology. 2000;42:17.
60. Rubio V. Modelación Matemática del Proceso de Remoción Electrocinética de Especies Contamiantes en Suelos [Maestría]. Hermosillo: Universidad de Sonora; 2004.
61. Peng C, Almeida J, Gu Q. Effect of electrode configuration on pH distribution and heavy metal ions migration during soil electrokinetic remediation. Environmental Earth Sciences. 2013;69(1):257-65.
62. Kim D, Jo S, Choi J, Yang J, Baek K. Hexagonal two dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study. Chemical Engineering Journal. 2012;198:110-21.
63. Dzenitis JM. Soil chemistry effects and flow prediction in electroremediation of soil. Environmental Science & Technology. 1997;31(4):1191-7.

APÉNDICE A:

**TWO-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL MODELING
OF THE ELECTROKINETIC REMEDIATION OF A
OPPER-CONTAMINATED SOIL.**

PART I: MODEL VALIDATION

**TWO-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL MODELING
OF THE ELECTROKINETIC REMEDIATION OF A
COPPER-CONTAMINATED SOIL.**

**PART II: SENSITIVITY ANALYSIS FOR A TRIANGULAR
SOIL FIELD**

APÉNDICE B:

EXPERIMENTO**1****CONDICIONES INICIALES**

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	25/10/2010
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:46:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.9
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.00
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	100.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	20.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			

1	0.1703	0.2541	15.345	2.21	62.00
2	0.2391	0.2144	14.85	2.11	68.00
3	0.1703	0.3335	14.949	2.13	71.00
4	0.2095	0.4014	12.969	1.99	122.00
5	0.2412	0.328	16.236	2.14	172.00
6	0.2757	0.3353	16.038	2.22	60.00
7	0.2933	0.3048	15.84	2.1	114.67
8	0.2697	0.2786	16.236	2.14	116.00
9	0.2375	0.2929	16.533	2.22	118.00
10	0.3175	0.2144	12.771	2.01	19.14
11	0.4255	0.2144	9.504	1.9	88.00
12	0.3715	0.3079	10.791	1.98	158.00
13	0.3175	0.4014	10.692	1.98	174.00
14	0.2635	0.495	9.603	1.91	134.00
15	0.3175	0.5885	7.326	1.85	152.00
16	0.3715	0.495	8.118	1.9	81.00
17	0.4255	0.4014	8.415	1.91	52.00
18	0.4795	0.3079	8.118	1.89	57.00
19	0.5335	0.2144	7.524	1.87	164.00
20	0.6415	0.2144	5.544	1.84	122.00
21	0.5875	0.3079	6.435	1.86	94.00
22	0.5335	0.4014	6.831	1.86	91.00
23	0.4795	0.495	6.633	1.86	110.00

24	0.4255	0.5885	6.336	1.9	58.00
25	0.3715	0.682	5.544	1.83	40.67
26	0.4255	0.7756	3.663	1.87	105.00
27	0.4795	0.682	4.455	1.93	66.00
28	0.5335	0.5885	5.247	1.84	44.00
29	0.5875	0.495	5.544	1.86	42.00
30	0.6415	0.4014	5.346	1.87	49.00
31	0.6955	0.3079	4.554	1.95	75.00
32	0.7495	0.2144	3.663	1.92	94.00
33	0.8279	0.2144	2.772	1.98	122.00
34	0.8967	0.2541	2.574	1.98	84.00
35	0.8295	0.2917	2.673	1.92	87.00
36	0.7973	0.2773	2.079	1.96	173.00
37	0.7737	0.3035	2.277	2.01	127.00
38	0.7913	0.3341	2.475	1.96	304.00
39	0.8258	0.3267	2.376	1.92	256.00
40	0.8967	0.3335	2.178	1.96	250.00
41	0.8575	0.4014	2.97	1.89	84.00
42	0.7495	0.4014	3.96	1.85	200.00
43	0.8035	0.495	4.059	1.81	126.00
44	0.6955	0.495	4.455	1.83	57.00
45	0.7495	0.5885	4.356	1.78	61.00
46	0.6415	0.5885	4.653	1.81	136.00
47	0.6955	0.682	4.059	1.8	81.00
48	0.5875	0.682	3.96	1.85	70.00
49	0.6415	0.7756	3.267	1.85	118.00
50	0.6023	0.8435	2.673	1.89	175.00
51	0.5335	0.8832	2.673	1.99	69.33
52	0.4647	0.8435	2.871	1.97	78.67
53	0.505	0.7848	2.277	2.04	104.00
54	0.5335	0.8056	2.178	2.12	91.33
55	0.562	0.7848	2.178	2	95.33
56	0.5511	0.7513	2.475	2.01	160.00
57	0.5159	0.7513	2.475	2.06	200.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			

1	0.1703	0.2541	17.82	1.78	109.00
2	0.2391	0.2144	17.622	1.88	120.00
3	0.1703	0.3335	17.721	1.82	89.00
4	0.2095	0.4014	16.83	1.75	111.00
5	0.2412	0.328	17.919	1.15	60.00
6	0.2757	0.3353	17.721	1.13	53.00
7	0.2933	0.3048	17.622	1.13	50.00
8	0.2697	0.2786	17.919	1.12	64.00
9	0.2375	0.2929	18.018	1.17	100.00
10	0.3175	0.2144	16.929	1.52	152.00
11	0.4255	0.2144	14.553	1.98	150.00
12	0.3715	0.3079	15.84	1.29	117.00
13	0.3175	0.4014	15.741	1.38	105.00
14	0.2635	0.495	14.355	2.1	89.00
15	0.3175	0.5885	11.88	1.95	103.00
16	0.3715	0.495	12.969	2.01	158.00
17	0.4255	0.4014	13.662	1.79	61.00
18	0.4795	0.3079	13.068	2.01	59.00
19	0.5335	0.2144	11.979	2.05	65.00
20	0.6415	0.2144	9.603	1.93	136.00
21	0.5875	0.3079	10.692	1.94	254.00
22	0.5335	0.4014	11.385	1.96	95.00
23	0.4795	0.495	11.187	1.95	190.00
24	0.4255	0.5885	10.593	1.92	272.00
25	0.3715	0.682	9.603	1.94	138.00
26	0.4255	0.7756	7.227	1.95	198.00
27	0.4795	0.682	8.415	2.01	130.00
28	0.5335	0.5885	9.306	1.93	56.00
29	0.5875	0.495	9.702	1.98	51.00
30	0.6415	0.4014	9.405	1.95	139.00
31	0.6955	0.3079	8.316	1.95	136.00
32	0.7495	0.2144	7.128	2	52.00
33	0.8279	0.2144	5.643	2.03	106.00
34	0.8967	0.2541	5.247	2.08	78.00
35	0.8295	0.2917	5.445	2.01	80.00

36	0.7973	0.2773	4.455	10.75	35.33
-----------	---------------	---------------	--------------	--------------	--------------

37	0.7737	0.3035	4.554	10.81	46.00
38	0.7913	0.3341	5.247	10.89	34.00
39	0.8258	0.3267	4.95	10.92	14.00
40	0.8967	0.3335	4.257	10.83	18.50
41	0.8575	0.4014	6.336	1.95	230.00
42	0.7495	0.4014	7.623	1.93	181.00
43	0.8035	0.495	7.722	1.89	149.00
44	0.6955	0.495	8.514	1.93	35.00
45	0.7495	0.5885	8.118	1.91	182.00
46	0.6415	0.5885	8.514	1.93	75.00
47	0.6955	0.682	7.821	1.89	234.00
48	0.5875	0.682	7.722	1.98	130.00
49	0.6415	0.7756	6.534	1.84	94.00
50	0.6023	0.8435	5.742	1.9	278.00
51	0.5335	0.8832	5.544	1.99	130.00
52	0.4647	0.8435	6.039	1.94	97.00
53	0.505	0.7848	4.95	10.54	30.00
54	0.5335	0.8056	4.455	10.92	35.00
55	0.562	0.7848	4.455	10.64	98.00
56	0.5511	0.7513	5.049	10.92	40.00
57	0.5159	0.7513	5.445	10.85	38.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			

1	0.1703	0.2541	17.919	1.4	158.00
2	0.2391	0.2144	17.82	1.32	144.00
3	0.1703	0.3335	17.82	1.28	118.00
4	0.2095	0.4014	17.127	1.35	80.00
5	0.2412	0.328	18.018	1.18	68.00
6	0.2757	0.3353	17.622	1.02	112.00
7	0.2933	0.3048	17.721	1.1	40.00
8	0.2697	0.2786	18.018	1.07	53.00
9	0.2375	0.2929	18.216	1.06	118.00
10	0.3175	0.2144	17.127	1.19	73.00
11	0.4255	0.2144	15.642	1.59	204.00
12	0.3715	0.3079	16.335	1.15	25.00
13	0.3175	0.4014	16.335	1.1	46.00
14	0.2635	0.495	15.444	1.7	216.00
15	0.3175	0.5885	13.464	1.97	216.00
16	0.3715	0.495	14.454	1.46	81.00
17	0.4255	0.4014	14.85	1.37	96.00
18	0.4795	0.3079	14.454	1.46	148.00
19	0.5335	0.2144	13.464	1.95	65.00
20	0.6415	0.2144	11.088	1.98	57.33
21	0.5875	0.3079	12.276	1.96	166.00
22	0.5335	0.4014	13.167	1.72	54.67
23	0.4795	0.495	12.969	1.77	61.00
24	0.4255	0.5885	12.177	1.93	80.00
25	0.3715	0.682	10.89	1.98	79.00
26	0.4255	0.7756	8.118	1.86	87.00
27	0.4795	0.682	9.603	1.89	186.00
28	0.5335	0.5885	10.791	1.87	88.00
29	0.5875	0.495	11.187	1.86	184.00
30	0.6415	0.4014	10.89	1.9	107.00
31	0.6955	0.3079	9.702	1.88	236.00
32	0.7495	0.2144	8.118	1.97	70.00
33	0.8279	0.2144	6.435	1.99	206.00
34	0.8967	0.2541	5.94	2.02	248.00
35	0.8295	0.2917	6.138	1.96	79.00

36	0.7973	0.2773	4.554	10.72	30.00
-----------	---------------	---------------	--------------	--------------	--------------

37	0.7737	0.3035	5.049	10.87	5.00
38	0.7913	0.3341	6.435	10.6	56.00
39	0.8258	0.3267	5.544	11.15	16.67
40	0.8967	0.3335	4.653	10.92	42.00
41	0.8575	0.4014	7.425	1.88	110.00
42	0.7495	0.4014	8.811	1.86	83.00
43	0.8035	0.495	8.91	1.82	118.67
44	0.6955	0.495	9.801	1.87	118.00
45	0.7495	0.5885	9.405	1.8	70.00
46	0.6415	0.5885	9.801	1.83	91.00
47	0.6955	0.682	8.91	1.79	296.00
48	0.5875	0.682	8.712	1.82	86.00
49	0.6415	0.7756	7.326	1.9	97.00
50	0.6023	0.8435	6.138	1.91	222.00
51	0.5335	0.8832	5.94	1.98	85.00
52	0.4647	0.8435	6.435	1.94	119.00
53	0.505	0.7848	5.148	10.78	17.00
54	0.5335	0.8056	4.158	10.74	10.00
55	0.562	0.7848	4.752	10.95	23.00
56	0.5511	0.7513	5.643	10.87	62.00
57	0.5159	0.7513	6.039	10.67	52.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.919	1.18	164.00
2	0.2391	0.2144	17.82	1.13	162.00
3	0.1703	0.3335	17.82	1.14	102.00
4	0.2095	0.4014	17.226	1.14	49.00
5	0.2412	0.328	18.018	1.05	128.00
6	0.2757	0.3353	17.919	1.2	55.00
7	0.2933	0.3048	17.82	0.98	56.00
8	0.2697	0.2786	18.018	0.99	74.00
9	0.2375	0.2929	18.117	1.02	76.00
10	0.3175	0.2144	17.226	1.09	86.00
11	0.4255	0.2144	16.137	1.34	110.00
12	0.3715	0.3079	16.632	1.11	45.00
13	0.3175	0.4014	16.632	1.02	154.00
14	0.2635	0.495	16.137	1.4	109.00
15	0.3175	0.5885	14.652	1.7	212.00
16	0.3715	0.495	15.345	1.33	156.00
17	0.4255	0.4014	15.642	1.16	116.00
18	0.4795	0.3079	15.345	1.26	49.00
19	0.5335	0.2144	14.751	1.7	60.00
20	0.6415	0.2144	12.969	1.94	52.00
21	0.5875	0.3079	13.86	1.61	96.00
22	0.5335	0.4014	14.355	1.45	46.00
23	0.4795	0.495	14.256	1.43	88.00
24	0.4255	0.5885	13.761	1.61	204.00
25	0.3715	0.682	12.672	2.03	78.00
26	0.4255	0.7756	9.702	2.02	186.00
27	0.4795	0.682	11.385	1.89	91.00
28	0.5335	0.5885	12.672	1.85	164.00
29	0.5875	0.495	13.068	1.78	92.00
30	0.6415	0.4014	12.771	1.79	312.00
31	0.6955	0.3079	11.583	1.89	178.00
32	0.7495	0.2144	9.9	1.97	73.00
33	0.8279	0.2144	7.524	1.98	107.00
34	0.8967	0.2541	7.029	2	102.00
35	0.8295	0.2917	7.326	1.98	206.00

36	0.7973	0.2773	5.643	10.63	38.00
-----------	---------------	---------------	--------------	--------------	--------------

37	0.7737	0.3035	4.554	10.79	30.00
38	0.7913	0.3341	6.237	10.45	98.00
39	0.8258	0.3267	5.841	11.08	76.00
40	0.8967	0.3335	5.643	10.85	17.00
41	0.8575	0.4014	8.91	1.91	140.00
42	0.7495	0.4014	10.791	1.96	80.00
43	0.8035	0.495	10.791	1.85	320.00
44	0.6955	0.495	11.682	2.68	190.00
45	0.7495	0.5885	11.286	1.8	116.00
46	0.6415	0.5885	11.682	1.83	248.00
47	0.6955	0.682	10.692	1.82	278.00
48	0.5875	0.682	10.494	1.89	93.00
49	0.6415	0.7756	8.712	1.95	196.00
50	0.6023	0.8435	7.128	2.02	58.00
51	0.5335	0.8832	6.93	2.04	104.00
52	0.4647	0.8435	7.623	2.05	40.00
53	0.505	0.7848	5.544	10.82	30.00
54	0.5335	0.8056	5.445	10.86	22.00
55	0.562	0.7848	5.841	10.92	12.00
56	0.5511	0.7513	6.534	10.88	13.00
57	0.5159	0.7513	4.653	10.93	84.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.721	1.28	64.67
2	0.2391	0.2144	17.622	1.25	66.00
3	0.1703	0.3335	17.622	1.21	40.00
4	0.2095	0.4014	17.127	1.2	59.00
5	0.2412	0.328	17.82	1.11	43.00
6	0.2757	0.3353	17.721	1.15	76.00
7	0.2933	0.3048	17.622	1.12	80.00
8	0.2697	0.2786	17.82	1.08	45.00
9	0.2375	0.2929	17.919	1.09	46.67
10	0.3175	0.2144	17.127	1.19	63.33
11	0.4255	0.2144	16.236	1.31	72.00
12	0.3715	0.3079	16.533	1.13	61.00
13	0.3175	0.4014	16.533	1.14	42.00
14	0.2635	0.495	16.137	1.28	146.00
15	0.3175	0.5885	14.949	1.51	87.00
16	0.3715	0.495	15.444	1.25	92.00
17	0.4255	0.4014	15.741	1.18	68.00
18	0.4795	0.3079	15.444	1.26	73.33
19	0.5335	0.2144	15.048	1.49	134.00
20	0.6415	0.2144	13.464	1.72	61.00
21	0.5875	0.3079	14.256	1.42	64.00
22	0.5335	0.4014	14.652	1.38	62.00
23	0.4795	0.495	14.553	1.39	46.00
24	0.4255	0.5885	14.157	1.42	66.67
25	0.3715	0.682	13.266	1.79	65.33
26	0.4255	0.7756	10.494	2	75.33
27	0.4795	0.682	12.177	1.69	74.67
28	0.5335	0.5885	13.266	1.67	72.67
29	0.5875	0.495	13.563	1.66	93.33
30	0.6415	0.4014	13.365	1.65	100.00
31	0.6955	0.3079	12.276	1.65	72.00
32	0.7495	0.2144	10.692	1.73	65.00
33	0.8279	0.2144	7.623	2.02	44.00
34	0.8967	0.2541	6.93	2.19	83.33
35	0.8295	0.2917	7.128	2.15	30.67

36	0.7973	0.2773	3.96	10.9	18.00
-----------	---------------	---------------	-------------	-------------	--------------

37	0.7737	0.3035	3.564	10.96	60.00
38	0.7913	0.3341	6.435	10.92	42.00
39	0.8258	0.3267	4.257	11.34	23.00
40	0.8967	0.3335	3.663	11	13.00
41	0.8575	0.4014	9.108	2.22	42.67
42	0.7495	0.4014	11.484	2.06	66.00
43	0.8035	0.495	11.484	2.02	86.67
44	0.6955	0.495	12.375	1.94	105.00
45	0.7495	0.5885	11.979	1.91	79.33
46	0.6415	0.5885	12.375	1.92	60.00
47	0.6955	0.682	11.385	1.92	61.33
48	0.5875	0.682	11.286	1.95	75.33
49	0.6415	0.7756	9.108	2.16	42.67
50	0.6023	0.8435	7.029	2.14	44.00
51	0.5335	0.8832	6.732	2.17	48.67
52	0.4647	0.8435	7.821	2.28	52.00
53	0.505	0.7848	3.96	11.02	23.33
54	0.5335	0.8056	4.752	10.51	8.67
55	0.562	0.7848	4.554	11.04	16.00
56	0.5511	0.7513	5.346	10.93	7.33
57	0.5159	0.7513	2.97	10.77	4.00

EXPERIMENTO

2

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	23/08/2010
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	13:00:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.9
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.00
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	100.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	30.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			

1	0.1703	0.2541	15.345	2.21	62.00
2	0.2391	0.2144	14.85	2.11	68.00
3	0.1703	0.3335	14.949	2.13	71.00
4	0.2095	0.4014	12.969	1.99	122.00
5	0.2412	0.328	16.236	2.14	172.00
6	0.2757	0.3353	16.038	2.22	60.00
7	0.2933	0.3048	15.84	2.1	114.67
8	0.2697	0.2786	16.236	2.14	116.00
9	0.2375	0.2929	16.533	2.22	118.00
10	0.3175	0.2144	12.771	2.01	19.14
11	0.4255	0.2144	9.504	1.9	88.00
12	0.3715	0.3079	10.791	1.98	158.00
13	0.3175	0.4014	10.692	1.98	174.00
14	0.2635	0.495	9.603	1.91	134.00
15	0.3175	0.5885	7.326	1.85	152.00
16	0.3715	0.495	8.118	1.9	81.00
17	0.4255	0.4014	8.415	1.91	52.00
18	0.4795	0.3079	8.118	1.89	57.00
19	0.5335	0.2144	7.524	1.87	164.00
20	0.6415	0.2144	5.544	1.84	122.00
21	0.5875	0.3079	6.435	1.86	94.00
22	0.5335	0.4014	6.831	1.86	91.00
23	0.4795	0.495	6.633	1.86	110.00

24	0.4255	0.5885	6.336	1.9	58.00
25	0.3715	0.682	5.544	1.83	40.67
26	0.4255	0.7756	3.663	1.87	105.00
27	0.4795	0.682	4.455	1.93	66.00
28	0.5335	0.5885	5.247	1.84	44.00
29	0.5875	0.495	5.544	1.86	42.00
30	0.6415	0.4014	5.346	1.87	49.00
31	0.6955	0.3079	4.554	1.95	75.00
32	0.7495	0.2144	3.663	1.92	94.00
33	0.8279	0.2144	2.772	1.98	122.00
34	0.8967	0.2541	2.574	1.98	84.00
35	0.8295	0.2917	2.673	1.92	87.00
36	0.7973	0.2773	2.079	1.96	173.00
37	0.7737	0.3035	2.277	2.01	127.00
38	0.7913	0.3341	2.475	1.96	304.00
39	0.8258	0.3267	2.376	1.92	256.00
40	0.8967	0.3335	2.178	1.96	250.00
41	0.8575	0.4014	2.97	1.89	84.00
42	0.7495	0.4014	3.96	1.85	200.00
43	0.8035	0.495	4.059	1.81	126.00
44	0.6955	0.495	4.455	1.83	57.00
45	0.7495	0.5885	4.356	1.78	61.00
46	0.6415	0.5885	4.653	1.81	136.00
47	0.6955	0.682	4.059	1.8	81.00
48	0.5875	0.682	3.96	1.85	70.00
49	0.6415	0.7756	3.267	1.85	118.00
50	0.6023	0.8435	2.673	1.89	175.00
51	0.5335	0.8832	2.673	1.99	69.33
52	0.4647	0.8435	2.871	1.97	78.67
53	0.505	0.7848	2.277	2.04	104.00
54	0.5335	0.8056	2.178	2.12	91.33
55	0.562	0.7848	2.178	2	95.33
56	0.5511	0.7513	2.475	2.01	160.00
57	0.5159	0.7513	2.475	2.06	200.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.82	1.78	109.00
2	0.2391	0.2144	17.622	1.88	120.00
3	0.1703	0.3335	17.721	1.82	89.00
4	0.2095	0.4014	16.83	1.75	111.00
5	0.2412	0.328	17.919	1.15	60.00
6	0.2757	0.3353	17.721	1.13	53.00
7	0.2933	0.3048	17.622	1.13	50.00
8	0.2697	0.2786	17.919	1.12	64.00
9	0.2375	0.2929	18.018	1.17	100.00
10	0.3175	0.2144	16.929	1.52	152.00
11	0.4255	0.2144	14.553	1.98	150.00
12	0.3715	0.3079	15.84	1.29	117.00
13	0.3175	0.4014	15.741	1.38	105.00
14	0.2635	0.495	14.355	2.1	89.00
15	0.3175	0.5885	11.88	1.95	103.00
16	0.3715	0.495	12.969	2.01	158.00
17	0.4255	0.4014	13.662	1.79	61.00
18	0.4795	0.3079	13.068	2.01	59.00
19	0.5335	0.2144	11.979	2.05	65.00
20	0.6415	0.2144	9.603	1.93	136.00
21	0.5875	0.3079	10.692	1.94	254.00
22	0.5335	0.4014	11.385	1.96	95.00
23	0.4795	0.495	11.187	1.95	190.00
24	0.4255	0.5885	10.593	1.92	272.00
25	0.3715	0.682	9.603	1.94	138.00
26	0.4255	0.7756	7.227	1.95	198.00
27	0.4795	0.682	8.415	2.01	130.00
28	0.5335	0.5885	9.306	1.93	56.00
29	0.5875	0.495	9.702	1.98	51.00
30	0.6415	0.4014	9.405	1.95	139.00
31	0.6955	0.3079	8.316	1.95	136.00
32	0.7495	0.2144	7.128	2	52.00
33	0.8279	0.2144	5.643	2.03	106.00
34	0.8967	0.2541	5.247	2.08	78.00
35	0.8295	0.2917	5.445	2.01	80.00
36	0.7973	0.2773	4.455	10.75	35.33

37	0.7737	0.3035	4.554	10.81	46.00
38	0.7913	0.3341	5.247	10.89	34.00
39	0.8258	0.3267	4.95	10.92	14.00
40	0.8967	0.3335	4.257	10.83	18.50
41	0.8575	0.4014	6.336	1.95	230.00
42	0.7495	0.4014	7.623	1.93	181.00
43	0.8035	0.495	7.722	1.89	149.00
44	0.6955	0.495	8.514	1.93	35.00
45	0.7495	0.5885	8.118	1.91	182.00
46	0.6415	0.5885	8.514	1.93	75.00
47	0.6955	0.682	7.821	1.89	234.00
48	0.5875	0.682	7.722	1.98	130.00
49	0.6415	0.7756	6.534	1.84	94.00
50	0.6023	0.8435	5.742	1.9	278.00
51	0.5335	0.8832	5.544	1.99	130.00
52	0.4647	0.8435	6.039	1.94	97.00
53	0.505	0.7848	4.95	10.54	30.00
54	0.5335	0.8056	4.455	10.92	35.00
55	0.562	0.7848	4.455	10.64	98.00
56	0.5511	0.7513	5.049	10.92	40.00
57	0.5159	0.7513	5.445	10.85	38.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.919	1.4	158.00
2	0.2391	0.2144	17.82	1.32	144.00
3	0.1703	0.3335	17.82	1.28	118.00
4	0.2095	0.4014	17.127	1.35	80.00
5	0.2412	0.328	18.018	1.18	68.00
6	0.2757	0.3353	17.622	1.02	112.00
7	0.2933	0.3048	17.721	1.1	40.00
8	0.2697	0.2786	18.018	1.07	53.00
9	0.2375	0.2929	18.216	1.06	118.00
10	0.3175	0.2144	17.127	1.19	73.00
11	0.4255	0.2144	15.642	1.59	204.00
12	0.3715	0.3079	16.335	1.15	25.00
13	0.3175	0.4014	16.335	1.1	46.00
14	0.2635	0.495	15.444	1.7	216.00
15	0.3175	0.5885	13.464	1.97	216.00
16	0.3715	0.495	14.454	1.46	81.00
17	0.4255	0.4014	14.85	1.37	96.00
18	0.4795	0.3079	14.454	1.46	148.00
19	0.5335	0.2144	13.464	1.95	65.00
20	0.6415	0.2144	11.088	1.98	57.33
21	0.5875	0.3079	12.276	1.96	166.00
22	0.5335	0.4014	13.167	1.72	54.67
23	0.4795	0.495	12.969	1.77	61.00
24	0.4255	0.5885	12.177	1.93	80.00
25	0.3715	0.682	10.89	1.98	79.00
26	0.4255	0.7756	8.118	1.86	87.00
27	0.4795	0.682	9.603	1.89	186.00
28	0.5335	0.5885	10.791	1.87	88.00
29	0.5875	0.495	11.187	1.86	184.00
30	0.6415	0.4014	10.89	1.9	107.00
31	0.6955	0.3079	9.702	1.88	236.00
32	0.7495	0.2144	8.118	1.97	70.00
33	0.8279	0.2144	6.435	1.99	206.00
34	0.8967	0.2541	5.94	2.02	248.00
35	0.8295	0.2917	6.138	1.96	79.00
36	0.7973	0.2773	4.554	10.72	30.00

37	0.7737	0.3035	5.049	10.87	5.00
38	0.7913	0.3341	6.435	10.6	56.00
39	0.8258	0.3267	5.544	11.15	16.67
40	0.8967	0.3335	4.653	10.92	42.00
41	0.8575	0.4014	7.425	1.88	110.00
42	0.7495	0.4014	8.811	1.86	83.00
43	0.8035	0.495	8.91	1.82	118.67
44	0.6955	0.495	9.801	1.87	118.00
45	0.7495	0.5885	9.405	1.8	70.00
46	0.6415	0.5885	9.801	1.83	91.00
47	0.6955	0.682	8.91	1.79	296.00
48	0.5875	0.682	8.712	1.82	86.00
49	0.6415	0.7756	7.326	1.9	97.00
50	0.6023	0.8435	6.138	1.91	222.00
51	0.5335	0.8832	5.94	1.98	85.00
52	0.4647	0.8435	6.435	1.94	119.00
53	0.505	0.7848	5.148	10.78	17.00
54	0.5335	0.8056	4.158	10.74	10.00
55	0.562	0.7848	4.752	10.95	23.00
56	0.5511	0.7513	5.643	10.87	62.00
57	0.5159	0.7513	6.039	10.67	52.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.919	1.18	164.00
2	0.2391	0.2144	17.82	1.13	162.00
3	0.1703	0.3335	17.82	1.14	102.00
4	0.2095	0.4014	17.226	1.14	49.00
5	0.2412	0.328	18.018	1.05	128.00
6	0.2757	0.3353	17.919	1.2	55.00
7	0.2933	0.3048	17.82	0.98	56.00
8	0.2697	0.2786	18.018	0.99	74.00
9	0.2375	0.2929	18.117	1.02	76.00
10	0.3175	0.2144	17.226	1.09	86.00
11	0.4255	0.2144	16.137	1.34	110.00
12	0.3715	0.3079	16.632	1.11	45.00
13	0.3175	0.4014	16.632	1.02	154.00
14	0.2635	0.495	16.137	1.4	109.00
15	0.3175	0.5885	14.652	1.7	212.00
16	0.3715	0.495	15.345	1.33	156.00
17	0.4255	0.4014	15.642	1.16	116.00
18	0.4795	0.3079	15.345	1.26	49.00
19	0.5335	0.2144	14.751	1.7	60.00
20	0.6415	0.2144	12.969	1.94	52.00
21	0.5875	0.3079	13.86	1.61	96.00
22	0.5335	0.4014	14.355	1.45	46.00
23	0.4795	0.495	14.256	1.43	88.00
24	0.4255	0.5885	13.761	1.61	204.00
25	0.3715	0.682	12.672	2.03	78.00
26	0.4255	0.7756	9.702	2.02	186.00
27	0.4795	0.682	11.385	1.89	91.00
28	0.5335	0.5885	12.672	1.85	164.00
29	0.5875	0.495	13.068	1.78	92.00
30	0.6415	0.4014	12.771	1.79	312.00
31	0.6955	0.3079	11.583	1.89	178.00
32	0.7495	0.2144	9.9	1.97	73.00
33	0.8279	0.2144	7.524	1.98	107.00
34	0.8967	0.2541	7.029	2	102.00
35	0.8295	0.2917	7.326	1.98	206.00
36	0.7973	0.2773	5.643	10.63	38.00

37	0.7737	0.3035	4.554	10.79	30.00
38	0.7913	0.3341	6.237	10.45	98.00
39	0.8258	0.3267	5.841	11.08	76.00
40	0.8967	0.3335	5.643	10.85	17.00
41	0.8575	0.4014	8.91	1.91	140.00
42	0.7495	0.4014	10.791	1.96	80.00
43	0.8035	0.495	10.791	1.85	320.00
44	0.6955	0.495	11.682	2.68	190.00
45	0.7495	0.5885	11.286	1.8	116.00
46	0.6415	0.5885	11.682	1.83	248.00
47	0.6955	0.682	10.692	1.82	278.00
48	0.5875	0.682	10.494	1.89	93.00
49	0.6415	0.7756	8.712	1.95	196.00
50	0.6023	0.8435	7.128	2.02	58.00
51	0.5335	0.8832	6.93	2.04	104.00
52	0.4647	0.8435	7.623	2.05	40.00
53	0.505	0.7848	5.544	10.82	30.00
54	0.5335	0.8056	5.445	10.86	22.00
55	0.562	0.7848	5.841	10.92	12.00
56	0.5511	0.7513	6.534	10.88	13.00
57	0.5159	0.7513	4.653	10.93	84.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.721	1.28	64.67
2	0.2391	0.2144	17.622	1.25	66.00
3	0.1703	0.3335	17.622	1.21	40.00
4	0.2095	0.4014	17.127	1.2	59.00
5	0.2412	0.328	17.82	1.11	43.00
6	0.2757	0.3353	17.721	1.15	76.00
7	0.2933	0.3048	17.622	1.12	80.00
8	0.2697	0.2786	17.82	1.08	45.00
9	0.2375	0.2929	17.919	1.09	46.67
10	0.3175	0.2144	17.127	1.19	63.33
11	0.4255	0.2144	16.236	1.31	72.00
12	0.3715	0.3079	16.533	1.13	61.00
13	0.3175	0.4014	16.533	1.14	42.00
14	0.2635	0.495	16.137	1.28	146.00
15	0.3175	0.5885	14.949	1.51	87.00
16	0.3715	0.495	15.444	1.25	92.00
17	0.4255	0.4014	15.741	1.18	68.00
18	0.4795	0.3079	15.444	1.26	73.33
19	0.5335	0.2144	15.048	1.49	134.00
20	0.6415	0.2144	13.464	1.72	61.00
21	0.5875	0.3079	14.256	1.42	64.00
22	0.5335	0.4014	14.652	1.38	62.00
23	0.4795	0.495	14.553	1.39	46.00
24	0.4255	0.5885	14.157	1.42	66.67
25	0.3715	0.682	13.266	1.79	65.33
26	0.4255	0.7756	10.494	2	75.33
27	0.4795	0.682	12.177	1.69	74.67
28	0.5335	0.5885	13.266	1.67	72.67
29	0.5875	0.495	13.563	1.66	93.33
30	0.6415	0.4014	13.365	1.65	100.00
31	0.6955	0.3079	12.276	1.65	72.00
32	0.7495	0.2144	10.692	1.73	65.00
33	0.8279	0.2144	7.623	2.02	44.00
34	0.8967	0.2541	6.93	2.19	83.33
35	0.8295	0.2917	7.128	2.15	30.67
36	0.7973	0.2773	3.96	10.9	18.00

37	0.7737	0.3035	3.564	10.96	60.00
38	0.7913	0.3341	6.435	10.92	42.00
39	0.8258	0.3267	4.257	11.34	23.00
40	0.8967	0.3335	3.663	11	13.00
41	0.8575	0.4014	9.108	2.22	42.67
42	0.7495	0.4014	11.484	2.06	66.00
43	0.8035	0.495	11.484	2.02	86.67
44	0.6955	0.495	12.375	1.94	105.00
45	0.7495	0.5885	11.979	1.91	79.33
46	0.6415	0.5885	12.375	1.92	60.00
47	0.6955	0.682	11.385	1.92	61.33
48	0.5875	0.682	11.286	1.95	75.33
49	0.6415	0.7756	9.108	2.16	42.67
50	0.6023	0.8435	7.029	2.14	44.00
51	0.5335	0.8832	6.732	2.17	48.67
52	0.4647	0.8435	7.821	2.28	52.00
53	0.505	0.7848	3.96	11.02	23.33
54	0.5335	0.8056	4.752	10.51	8.67
55	0.562	0.7848	4.554	11.04	16.00
56	0.5511	0.7513	5.346	10.93	7.33
57	0.5159	0.7513	2.97	10.77	4.00

EXPERIMENTO

3

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	12/10/2010
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	11:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.98
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.082
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	100.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	40.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	33.066	1.95	131.00
2	0.2391	0.2144	32.274	1.95	56.00
3	0.1703	0.3335	32.472	2	8.00
4	0.2095	0.4014	28.908	2.04	38.00
5	0.2412	0.328	34.056	1.9	6.00
6	0.2757	0.3353	33.066	1.93	108.00
7	0.2933	0.3048	33.264	1.92	66.67
8	0.2697	0.2786	34.65	1.8	60.00
9	0.2375	0.2929	34.848	1.83	55.00
10	0.3175	0.2144	29.304	1.88	91.00
11	0.4255	0.2144	21.582	2	85.00
12	0.3715	0.3079	24.552	1.94	46.00
13	0.3175	0.4014	24.75	1.94	53.00
14	0.2635	0.495	21.582	1.82	123.00
15	0.3175	0.5885	15.444	1.82	83.00
16	0.3715	0.495	17.82	1.87	80.00
17	0.4255	0.4014	18.81	1.83	63.00
18	0.4795	0.3079	17.622	1.93	48.00
19	0.5335	0.2144	15.444	1.88	120.00
20	0.6415	0.2144	10.098	1.76	110.00
21	0.5875	0.3079	12.474	1.79	174.00
22	0.5335	0.4014	14.058	1.74	61.00
23	0.4795	0.495	14.058	1.93	47.00

24	0.4255	0.5885	12.672	1.78	132.00
25	0.3715	0.682	10.494	1.74	137.00
26	0.4255	0.7756	6.138	1.77	87.00
27	0.4795	0.682	7.92	1.84	106.00
28	0.5335	0.5885	10.296	1.79	129.00
29	0.5875	0.495	10.692	1.78	78.00
30	0.6415	0.4014	10.098	1.85	87.00
31	0.6955	0.3079	7.92	1.83	92.00
32	0.7495	0.2144	6.138	1.73	131.00
33	0.8279	0.2144	4.158	1.72	163.00
34	0.8967	0.2541	3.762	1.59	97.33
35	0.8295	0.2917	3.96	1.6	112.00
36	0.7973	0.2773	2.772	1.73	152.00
37	0.7737	0.3035	3.366	1.77	112.00
38	0.7913	0.3341	3.762	1.74	117.33
39	0.8258	0.3267	3.762	1.74	119.00
40	0.8967	0.3335	3.168	1.77	132.00
41	0.8575	0.4014	4.95	1.73	109.00
42	0.7495	0.4014	6.93	1.74	124.00
43	0.8035	0.495	7.128	1.74	126.00
44	0.6955	0.495	8.514	1.82	115.00
45	0.7495	0.5885	7.92	1.8	111.33
46	0.6415	0.5885	8.514	1.88	136.00
47	0.6955	0.682	7.128	1.81	150.00
48	0.5875	0.682	6.732	1.83	104.67
49	0.6415	0.7756	4.95	1.77	119.00
50	0.6023	0.8435	3.762	1.81	95.00
51	0.5335	0.8832	3.762	1.87	111.00
52	0.4647	0.8435	4.158	1.75	113.00
53	0.505	0.7848	2.97	1.74	152.00
54	0.5335	0.8056	2.772	1.76	81.33
55	0.562	0.7848	2.97	1.73	114.00
56	0.5511	0.7513	3.564	1.73	146.00
57	0.5159	0.7513	3.564	1.83	133.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	37.224	1.78	117.00
2	0.2391	0.2144	37.224	2.27	72.00
3	0.1703	0.3335	37.224	1.93	119.00
4	0.2095	0.4014	36.036	1.83	71.33
5	0.2412	0.328	37.422	1.36	29.00
6	0.2757	0.3353	36.828	1.34	29.00
7	0.2933	0.3048	37.026	1.34	24.00
8	0.2697	0.2786	37.62	1.3	18.00
9	0.2375	0.2929	37.62	1.44	28.00
10	0.3175	0.2144	36.234	1.64	125.00
11	0.4255	0.2144	33.264	5.1	177.00
12	0.3715	0.3079	34.65	1.48	74.00
13	0.3175	0.4014	34.452	1.36	67.00
14	0.2635	0.495	32.868	1.81	92.00
15	0.3175	0.5885	28.512	2.12	105.00
16	0.3715	0.495	30.888	1.81	53.00
17	0.4255	0.4014	31.878	1.59	99.00
18	0.4795	0.3079	31.284	1.73	102.00
19	0.5335	0.2144	29.502	1.93	146.00
20	0.6415	0.2144	25.542	1.85	114.00
21	0.5875	0.3079	27.324	1.92	123.00
22	0.5335	0.4014	28.512	2.04	90.00
23	0.4795	0.495	28.116	1.89	89.00
24	0.4255	0.5885	26.334	1.7	102.00
25	0.3715	0.682	23.958	1.88	110.00
26	0.4255	0.7756	19.8	1.85	99.00
27	0.4795	0.682	21.78	1.88	120.00
28	0.5335	0.5885	24.156	1.8	131.00
29	0.5875	0.495	25.344	1.82	88.00
30	0.6415	0.4014	25.146	1.79	99.00
31	0.6955	0.3079	23.562	1.94	120.00
32	0.7495	0.2144	22.176	1.88	80.00
33	0.8279	0.2144	20.196	1.83	92.00
34	0.8967	0.2541	19.8	1.49	100.00
35	0.8295	0.2917	19.998	1.82	84.00
36	0.7973	0.2773	15.444	2.03	64.00

37	0.7737	0.3035	18.612	4.2	22.00
38	0.7913	0.3341	9.504	10.61	3.00
39	0.8258	0.3267	7.524	11.3	0.00
40	0.8967	0.3335	18.216	10.42	0.00
41	0.8575	0.4014	20.988	1.97	72.00
42	0.7495	0.4014	22.77	2.02	96.00
43	0.8035	0.495	22.572	1.87	94.00
44	0.6955	0.495	23.562	2.1	1.00
45	0.7495	0.5885	22.572	1.42	106.00
46	0.6415	0.5885	22.968	1.89	124.00
47	0.6955	0.682	21.384	1.85	132.00
48	0.5875	0.682	20.592	1.85	101.00
49	0.6415	0.7756	18.612	1.87	112.00
50	0.6023	0.8435	17.226	1.92	60.00
51	0.5335	0.8832	17.028	1.99	120.00
52	0.4647	0.8435	17.622	1.94	5.00
53	0.505	0.7848	10.296	10.77	8.00
54	0.5335	0.8056	4.356	10.46	2.00
55	0.562	0.7848	13.266	8.32	8.00
56	0.5511	0.7513	15.642	10.87	6.00
57	0.5159	0.7513	15.84	2.07	109.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	37.422	1.29	19.00
2	0.2391	0.2144	37.224	1.31	114.00
3	0.1703	0.3335	37.422	1.28	33.00
4	0.2095	0.4014	36.432	1.3	23.00
5	0.2412	0.328	37.62	1.25	22.00
6	0.2757	0.3353	37.224	1.21	16.00
7	0.2933	0.3048	37.224	1.19	21.00
8	0.2697	0.2786	37.62	1.24	18.00
9	0.2375	0.2929	37.818	1.19	40.00
10	0.3175	0.2144	36.63	1.3	23.00
11	0.4255	0.2144	34.65	1.6	22.00
12	0.3715	0.3079	35.442	1.25	22.00
13	0.3175	0.4014	35.244	1.21	17.00
14	0.2635	0.495	34.452	1.56	94.00
15	0.3175	0.5885	31.878	1.72	98.00
16	0.3715	0.495	33.264	1.43	94.00
17	0.4255	0.4014	33.66	1.35	55.00
18	0.4795	0.3079	33.264	1.38	92.00
19	0.5335	0.2144	32.274	1.73	123.00
20	0.6415	0.2144	29.106	1.84	92.00
21	0.5875	0.3079	30.69	1.7	105.00
22	0.5335	0.4014	31.68	1.6	61.00
23	0.4795	0.495	31.68	1.57	64.00
24	0.4255	0.5885	30.492	1.67	46.00
25	0.3715	0.682	28.71	1.78	84.00
26	0.4255	0.7756	24.948	1.84	46.00
27	0.4795	0.682	26.73	2.12	71.00
28	0.5335	0.5885	28.71	1.84	108.00
29	0.5875	0.495	29.502	1.75	84.00
30	0.6415	0.4014	28.908	1.99	86.00
31	0.6955	0.3079	27.324	1.93	94.00
32	0.7495	0.2144	25.344	1.76	91.00
33	0.8279	0.2144	22.968	1.86	87.00
34	0.8967	0.2541	22.176	1.85	50.00
35	0.8295	0.2917	22.374	1.79	19.00
36	0.7973	0.2773	8.712	10.61	0.00

37	0.7737	0.3035	12.276	10.54	2.00
38	0.7913	0.3341	7.524	2.58	91.00
39	0.8258	0.3267	5.742	10.99	0.00
40	0.8967	0.3335	13.068	10.68	0.00
41	0.8575	0.4014	23.958	1.96	43.00
42	0.7495	0.4014	26.334	1.9	22.00
43	0.8035	0.495	26.334	1.8	85.00
44	0.6955	0.495	27.72	1.88	91.00
45	0.7495	0.5885	26.928	1.96	74.00
46	0.6415	0.5885	27.522	1.86	112.00
47	0.6955	0.682	26.136	1.86	115.00
48	0.5875	0.682	25.74	1.88	90.00
49	0.6415	0.7756	23.76	1.81	58.00
50	0.6023	0.8435	22.572	1.89	35.00
51	0.5335	0.8832	22.572	1.89	74.00
52	0.4647	0.8435	23.166	1.91	94.00
53	0.505	0.7848	3.762	10.84	10.00
54	0.5335	0.8056	3.96	10.85	0.00
55	0.562	0.7848	5.346	10.69	1.00
56	0.5511	0.7513	17.424	10.83	10.00
57	0.5159	0.7513	19.404	6.67	130.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	37.62	1.15	40.00
2	0.2391	0.2144	37.422	1.14	30.00
3	0.1703	0.3335	37.422	1.14	24.00
4	0.2095	0.4014	36.63	1.12	25.00
5	0.2412	0.328	37.62	1.1	27.00
6	0.2757	0.3353	37.422	1.05	40.00
7	0.2933	0.3048	37.422	1.06	16.00
8	0.2697	0.2786	37.818	1.05	18.00
9	0.2375	0.2929	37.818	1.07	21.00
10	0.3175	0.2144	36.828	1.14	28.00
11	0.4255	0.2144	35.046	1.29	102.00
12	0.3715	0.3079	35.64	1.12	27.00
13	0.3175	0.4014	35.64	1.1	21.00
14	0.2635	0.495	34.848	1.24	75.00
15	0.3175	0.5885	32.67	1.44	119.00
16	0.3715	0.495	33.66	1.17	19.00
17	0.4255	0.4014	34.254	1.14	30.00
18	0.4795	0.3079	33.858	1.18	35.00
19	0.5335	0.2144	33.264	1.45	89.00
20	0.6415	0.2144	30.888	1.66	146.00
21	0.5875	0.3079	32.076	1.38	105.00
22	0.5335	0.4014	32.67	1.29	74.00
23	0.4795	0.495	32.472	1.28	79.00
24	0.4255	0.5885	31.284	1.32	83.00
25	0.3715	0.682	29.898	1.56	43.00
26	0.4255	0.7756	25.938	1.69	74.00
27	0.4795	0.682	27.918	1.5	80.00
28	0.5335	0.5885	29.7	1.49	63.00
29	0.5875	0.495	30.888	1.48	42.00
30	0.6415	0.4014	30.69	1.54	123.00
31	0.6955	0.3079	29.304	1.62	101.00
32	0.7495	0.2144	27.72	1.72	112.00
33	0.8279	0.2144	25.344	1.73	159.00
34	0.8967	0.2541	24.552	1.72	45.00
35	0.8295	0.2917	24.354	1.69	27.33
36	0.7973	0.2773	7.524	10.75	3.00

37	0.7737	0.3035	6.534	10.57	0.00
38	0.7913	0.3341	5.544	10.85	1.00
39	0.8258	0.3267	3.564	10.85	4.00
40	0.8967	0.3335	7.524	10.78	0.00
41	0.8575	0.4014	26.136	2.13	47.00
42	0.7495	0.4014	28.314	1.95	47.00
43	0.8035	0.495	28.314	1.78	84.00
44	0.6955	0.495	29.304	1.82	101.00
45	0.7495	0.5885	28.512	1.8	98.00
46	0.6415	0.5885	28.908	1.84	67.00
47	0.6955	0.682	27.324	1.83	94.00
48	0.5875	0.682	26.73	1.83	57.00
49	0.6415	0.7756	24.354	1.89	71.00
50	0.6023	0.8435	22.374	1.87	31.00
51	0.5335	0.8832	22.176	1.88	98.00
52	0.4647	0.8435	23.364	1.94	54.00
53	0.505	0.7848	3.96	10.75	14.00
54	0.5335	0.8056	2.772	10.77	0.00
55	0.562	0.7848	3.96	10.79	2.00
56	0.5511	0.7513	14.454	10.54	7.00
57	0.5159	0.7513	20.592	2.12	103.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	37.62	1.16	25.00
2	0.2391	0.2144	37.62	1.15	15.00
3	0.1703	0.3335	37.62	1.15	23.00
4	0.2095	0.4014	37.026	1.14	53.00
5	0.2412	0.328	37.818	1.09	16.00
6	0.2757	0.3353	37.62	1.07	15.00
7	0.2933	0.3048	37.62	1.08	8.00
8	0.2697	0.2786	38.016	1.07	14.00
9	0.2375	0.2929	38.016	1.06	15.00
10	0.3175	0.2144	37.224	1.12	30.00
11	0.4255	0.2144	35.838	1.22	52.00
12	0.3715	0.3079	36.234	1.11	12.00
13	0.3175	0.4014	36.234	1.08	10.00
14	0.2635	0.495	35.64	1.13	23.00
15	0.3175	0.5885	34.254	1.31	41.00
16	0.3715	0.495	34.848	1.18	21.00
17	0.4255	0.4014	35.046	1.14	16.00
18	0.4795	0.3079	34.848	1.15	27.00
19	0.5335	0.2144	34.254	1.39	101.00
20	0.6415	0.2144	32.274	1.59	56.00
21	0.5875	0.3079	33.462	1.36	54.00
22	0.5335	0.4014	33.858	1.027	41.00
23	0.4795	0.495	33.858	1.23	35.00
24	0.4255	0.5885	33.264	1.24	48.00
25	0.3715	0.682	32.076	1.46	96.00
26	0.4255	0.7756	29.106	1.65	39.00
27	0.4795	0.682	30.888	1.43	85.00
28	0.5335	0.5885	32.076	1.41	44.00
29	0.5875	0.495	32.67	1.43	59.00
30	0.6415	0.4014	32.274	1.43	45.00
31	0.6955	0.3079	30.888	1.49	62.00
32	0.7495	0.2144	29.304	1.73	98.00
33	0.8279	0.2144	26.928	1.92	38.00
34	0.8967	0.2541	25.938	1.87	24.00
35	0.8295	0.2917	25.542	1.93	30.00
36	0.7973	0.2773	5.742	10.8	0.00

37	0.7737	0.3035	5.94	10.72	2.00
38	0.7913	0.3341	12.474	10.78	7.00
39	0.8258	0.3267	3.366	10.89	12.00
40	0.8967	0.3335	6.336	10.82	0.00
41	0.8575	0.4014	27.72	2.27	26.00
42	0.7495	0.4014	30.096	1.92	29.00
43	0.8035	0.495	30.294	1.98	42.00
44	0.6955	0.495	31.482	1.92	32.00
45	0.7495	0.5885	30.888	1.95	51.00
46	0.6415	0.5885	31.284	1.9	51.00
47	0.6955	0.682	30.096	1.83	45.00
48	0.5875	0.682	29.7	1.77	43.00
49	0.6415	0.7756	27.324	2.01	60.00
50	0.6023	0.8435	23.562	2.46	0.00
51	0.5335	0.8832	22.968	2.42	14.00
52	0.4647	0.8435	25.74	2.21	27.00
53	0.505	0.7848	3.564	10.86	10.00
54	0.5335	0.8056	2.97	10.84	0.00
55	0.562	0.7848	3.96	10.72	2.00
56	0.5511	0.7513	10.296	10.15	1.00
57	0.5159	0.7513	11.088	8.75	0.00

EXPERIMENTO

4

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	25/10/2010
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:47:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.9
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.00
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	100.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	50.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	41.591	1.76	174.00
2	0.2391	0.2144	40.795	1.74	115.00
3	0.1703	0.3335	40.994	1.76	148.00
4	0.2095	0.4014	36.616	1.75	196.00
5	0.2412	0.328	42.984	1.78	175.00
6	0.2757	0.3353	41.79	1.8	222.00
7	0.2933	0.3048	41.79	1.85	180.00
8	0.2697	0.2786	43.183	1.81	210.00
9	0.2375	0.2929	43.979	1.78	175.00
10	0.3175	0.2144	36.815	1.79	213.00
11	0.4255	0.2144	27.661	1.8	179.00
12	0.3715	0.3079	31.442	1.82	169.00
13	0.3175	0.4014	31.641	1.8	249.00
14	0.2635	0.495	27.86	1.8	172.00
15	0.3175	0.5885	20.298	1.73	171.00
16	0.3715	0.495	23.084	1.8	239.00
17	0.4255	0.4014	24.676	1.79	138.00
18	0.4795	0.3079	22.885	1.8	162.00
19	0.5335	0.2144	19.9	1.76	163.00
20	0.6415	0.2144	13.333	1.66	169.00
21	0.5875	0.3079	16.119	1.74	170.00
22	0.5335	0.4014	18.308	1.83	203.00
23	0.4795	0.495	18.308	1.8	265.00

24	0.4255	0.5885	16.517	1.72	211.00
25	0.3715	0.682	13.93	1.76	248.00
26	0.4255	0.7756	7.96	1.72	179.00
27	0.4795	0.682	10.547	1.76	187.00
28	0.5335	0.5885	13.333	1.77	217.00
29	0.5875	0.495	14.129	1.79	133.00
30	0.6415	0.4014	12.935	1.76	207.00
31	0.6955	0.3079	10.348	1.71	191.00
32	0.7495	0.2144	7.96	1.67	214.00
33	0.8279	0.2144	5.373	1.67	498.00
34	0.8967	0.2541	4.776	1.65	162.00
35	0.8295	0.2917	4.776	1.66	242.00
36	0.7973	0.2773	3.582	1.73	176.00
37	0.7737	0.3035	4.378	1.69	160.00
38	0.7913	0.3341	4.975	1.69	162.00
39	0.8258	0.3267	4.577	1.72	191.00
40	0.8967	0.3335	3.98	1.69	188.00
41	0.8575	0.4014	6.368	1.7	206.00
42	0.7495	0.4014	8.557	1.73	180.00
43	0.8035	0.495	8.955	1.72	175.00
44	0.6955	0.495	10.945	1.74	161.00
45	0.7495	0.5885	10.149	1.74	113.00
46	0.6415	0.5885	11.144	1.78	157.00
47	0.6955	0.682	9.154	1.75	302.00
48	0.5875	0.682	8.756	1.73	159.00
49	0.6415	0.7756	6.368	1.71	161.00
50	0.6023	0.8435	4.975	1.73	158.00
51	0.5335	0.8832	4.975	1.8	293.00
52	0.4647	0.8435	5.572	1.74	235.00
53	0.505	0.7848	4.179	1.74	176.00
54	0.5335	0.8056	3.582	1.73	202.00
55	0.562	0.7848	3.98	1.74	157.00
56	0.5511	0.7513	4.975	1.75	225.00
57	0.5159	0.7513	5.174	1.74	199.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	46.168	1.51	109.00
2	0.2391	0.2144	46.367	1.41	103.00
3	0.1703	0.3335	46.168	1.32	86.00
4	0.2095	0.4014	46.168	1.33	99.00
5	0.2412	0.328	46.367	1.13	37.00
6	0.2757	0.3353	46.168	1.07	46.00
7	0.2933	0.3048	46.168	1.06	41.00
8	0.2697	0.2786	46.367	1.04	50.00
9	0.2375	0.2929	46.168	1.04	49.00
10	0.3175	0.2144	46.168	1.19	81.00
11	0.4255	0.2144	43.581	1.52	195.00
12	0.3715	0.3079	44.775	1.1	56.00
13	0.3175	0.4014	45.173	1.08	57.00
14	0.2635	0.495	43.581	1.57	178.00
15	0.3175	0.5885	39.999	1.68	193.00
16	0.3715	0.495	41.79	1.49	130.00
17	0.4255	0.4014	42.785	1.33	198.00
18	0.4795	0.3079	41.79	1.4	166.00
19	0.5335	0.2144	39.601	1.69	300.00
20	0.6415	0.2144	35.024	1.78	91.00
21	0.5875	0.3079	37.213	1.78	195.00
22	0.5335	0.4014	39.004	1.69	150.00
23	0.4795	0.495	39.004	1.7	184.00
24	0.4255	0.5885	37.611	1.78	150.00
25	0.3715	0.682	35.621	1.79	99.00
26	0.4255	0.7756	30.646	1.75	122.00
27	0.4795	0.682	33.034	1.82	156.00
28	0.5335	0.5885	35.223	1.81	194.00
29	0.5875	0.495	35.82	1.82	194.00
30	0.6415	0.4014	34.825	1.82	153.00
31	0.6955	0.3079	32.636	1.81	145.00
32	0.7495	0.2144	29.651	1.84	125.00
33	0.8279	0.2144	26.268	1.78	186.00
34	0.8967	0.2541	25.671	1.76	121.00
35	0.8295	0.2917	26.069	1.79	115.00
36	0.7973	0.2773	23.88	10.68	25.00

37	0.7737	0.3035	10.348	10.92	26.00
38	0.7913	0.3341	11.94	10.66	30.00
39	0.8258	0.3267	14.726	10.61	33.00
40	0.8967	0.3335	8.557	10.76	19.00
41	0.8575	0.4014	28.258	1.89	129.00
42	0.7495	0.4014	31.044	1.89	137.00
43	0.8035	0.495	31.442	1.87	122.00
44	0.6955	0.495	33.233	1.52	128.00
45	0.7495	0.5885	32.636	1.87	122.00
46	0.6415	0.5885	33.432	1.91	177.00
47	0.6955	0.682	31.84	1.88	146.00
48	0.5875	0.682	31.641	1.89	222.00
49	0.6415	0.7756	29.054	1.96	218.00
50	0.6023	0.8435	26.865	1.87	98.00
51	0.5335	0.8832	26.666	1.92	149.00
52	0.4647	0.8435	27.661	1.87	144.00
53	0.505	0.7848	8.159	10.72	18.00
54	0.5335	0.8056	16.119	10.62	18.00
55	0.562	0.7848	4.975	10.73	19.00
56	0.5511	0.7513	26.865	10.64	20.00
57	0.5159	0.7513	13.333	10.76	23.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	46.168	1.14	61.00
2	0.2391	0.2144	46.168	1.12	93.00
3	0.1703	0.3335	46.168	1.05	51.00
4	0.2095	0.4014	46.168	1.08	59.00
5	0.2412	0.328	46.168	0.91	54.00
6	0.2757	0.3353	46.168	0.84	48.00
7	0.2933	0.3048	46.367	0.85	40.00
8	0.2697	0.2786	46.168	0.89	52.00
9	0.2375	0.2929	46.168	1.02	47.00
10	0.3175	0.2144	46.168	1.15	96.00
11	0.4255	0.2144	44.576	1.01	90.00
12	0.3715	0.3079	45.571	0.98	53.00
13	0.3175	0.4014	45.372	1.26	153.00
14	0.2635	0.495	44.576	1.54	119.00
15	0.3175	0.5885	42.984	1.22	114.00
16	0.3715	0.495	43.78	1.11	59.00
17	0.4255	0.4014	44.178	1.14	67.00
18	0.4795	0.3079	43.78	1.42	70.00
19	0.5335	0.2144	42.984	1.43	153.00
20	0.6415	0.2144	40.198	1.41	224.00
21	0.5875	0.3079	41.591	1.33	27.67
22	0.5335	0.4014	42.387	1.33	137.00
23	0.4795	0.495	42.387	1.39	137.00
24	0.4255	0.5885	41.79	1.4	151.00
25	0.3715	0.682	40.397	1.66	115.00
26	0.4255	0.7756	36.019	1.77	129.00
27	0.4795	0.682	38.606	1.68	159.00
28	0.5335	0.5885	40.198	1.65	198.00
29	0.5875	0.495	40.795	1.59	156.00
30	0.6415	0.4014	40.198	1.59	154.00
31	0.6955	0.3079	38.407	1.65	151.00
32	0.7495	0.2144	35.422	1.87	69.00
33	0.8279	0.2144	30.049	1.91	90.00
34	0.8967	0.2541	28.656	1.72	95.00
35	0.8295	0.2917	29.651	1.95	52.00
36	0.7973	0.2773	12.139	10.75	25.00

37	0.7737	0.3035	6.368	10.94	38.00
38	0.7913	0.3341	6.766	10.99	28.00
39	0.8258	0.3267	6.766	10.95	23.00
40	0.8967	0.3335	6.368	10.79	38.00
41	0.8575	0.4014	34.029	2.12	86.00
42	0.7495	0.4014	37.014	20.02	163.00
43	0.8035	0.495	37.213	1.92	117.00
44	0.6955	0.495	38.805	1.96	132.00
45	0.7495	0.5885	38.208	1.91	86.00
46	0.6415	0.5885	38.805	1.95	171.00
47	0.6955	0.682	37.412	1.91	127.00
48	0.5875	0.682	37.213	2.26	116.00
49	0.6415	0.7756	34.228	2.01	147.00
50	0.6023	0.8435	28.258	2	67.00
51	0.5335	0.8832	27.661	2.03	76.00
52	0.4647	0.8435	30.248	2.24	59.00
53	0.505	0.7848	6.368	10.84	23.00
54	0.5335	0.8056	6.169	10.72	20.00
55	0.562	0.7848	4.378	10.77	16.00
56	0.5511	0.7513	11.144	10.75	35.00
57	0.5159	0.7513	6.567	10.73	32.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	41.193	1.3	77.00
2	0.2391	0.2144	41.193	1.28	10.00
3	0.1703	0.3335	40.994	1.23	75.00
4	0.2095	0.4014	40.795	1.25	76.00
5	0.2412	0.328	41.392	1.16	67.00
6	0.2757	0.3353	41.392	1.12	24.00
7	0.2933	0.3048	41.193	1.1	31.00
8	0.2697	0.2786	41.193	1.12	84.00
9	0.2375	0.2929	41.193	1.13	61.00
10	0.3175	0.2144	40.795	1.22	110.00
11	0.4255	0.2144	40.198	1.25	84.00
12	0.3715	0.3079	40.596	1.19	66.00
13	0.3175	0.4014	40.596	1.18	77.00
14	0.2635	0.495	40.198	1.28	82.00
15	0.3175	0.5885	39.402	1.51	151.00
16	0.3715	0.495	39.8	1.34	77.00
17	0.4255	0.4014	39.999	1.26	73.00
18	0.4795	0.3079	39.8	1.25	70.00
19	0.5335	0.2144	39.601	1.42	141.00
20	0.6415	0.2144	38.208	1.64	180.00
21	0.5875	0.3079	39.004	1.5	147.00
22	0.5335	0.4014	39.402	1.4	108.00
23	0.4795	0.495	39.402	1.37	95.00
24	0.4255	0.5885	39.004	1.44	143.00
25	0.3715	0.682	38.606	1.64	117.00
26	0.4255	0.7756	36.616	1.73	80.00
27	0.4795	0.682	37.81	1.7	153.00
28	0.5335	0.5885	38.407	1.62	194.00
29	0.5875	0.495	38.606	1.59	125.00
30	0.6415	0.4014	38.407	1.61	174.00
31	0.6955	0.3079	37.611	1.67	149.00
32	0.7495	0.2144	36.019	2.19	103.00
33	0.8279	0.2144	31.641	2.06	80.00
34	0.8967	0.2541	29.253	2.18	53.00
35	0.8295	0.2917	26.268	4.47	14.00
36	0.7973	0.2773	17.512	10.65	53.00

37	0.7737	0.3035	17.512	10.94	49.00
38	0.7913	0.3341	17.711	11.42	54.00
39	0.8258	0.3267	17.313	11.66	196.00
40	0.8967	0.3335	18.507	10.92	65.00
41	0.8575	0.4014	35.82	2.06	100.00
42	0.7495	0.4014	37.014	2.07	156.00
43	0.8035	0.495	37.213	2.08	121.00
44	0.6955	0.495	37.81	2.03	-34.50
45	0.7495	0.5885	37.412	2.05	130.00
46	0.6415	0.5885	37.81	2.05	179.00
47	0.6955	0.682	37.213	2	140.00
48	0.5875	0.682	37.014	1.96	148.00
49	0.6415	0.7756	33.432	3.34	27.00
50	0.6023	0.8435	18.706	3.16	23.00
51	0.5335	0.8832	18.706	2.36	99.00
52	0.4647	0.8435	20.298	3.42	10.00
53	0.505	0.7848	15.323	10.75	61.00
54	0.5335	0.8056	15.323	10.47	20.00
55	0.562	0.7848	15.323	10.84	38.00
56	0.5511	0.7513	22.885	11.27	67.00
57	0.5159	0.7513	16.318	10.96	50.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	44.576	1.39	81.00
2	0.2391	0.2144	44.775	1.32	101.00
3	0.1703	0.3335	44.576	1.29	107.00
4	0.2095	0.4014	44.576	1.29	97.00
5	0.2412	0.328	44.576	1.21	67.00
6	0.2757	0.3353	45.173	1.14	36.00
7	0.2933	0.3048	44.974	1.15	39.00
8	0.2697	0.2786	44.775	1.17	66.00
9	0.2375	0.2929	44.576	1.21	96.00
10	0.3175	0.2144	44.576	1.26	98.00
11	0.4255	0.2144	43.979	1.27	89.00
12	0.3715	0.3079	44.377	1.24	46.00
13	0.3175	0.4014	44.576	1.18	76.00
14	0.2635	0.495	44.178	1.3	100.00
15	0.3175	0.5885	43.581	1.49	68.00
16	0.3715	0.495	43.78	1.33	80.00
17	0.4255	0.4014	43.78	1.29	70.00
18	0.4795	0.3079	43.78	1.31	69.00
19	0.5335	0.2144	43.581	1.42	137.00
20	0.6415	0.2144	42.586	1.62	206.00
21	0.5875	0.3079	43.183	1.45	144.00
22	0.5335	0.4014	43.382	1.36	95.00
23	0.4795	0.495	43.382	1.37	106.00
24	0.4255	0.5885	43.183	1.76	125.00
25	0.3715	0.682	42.785	1.71	173.00
26	0.4255	0.7756	41.392	2.05	130.00
27	0.4795	0.682	42.188	1.91	137.00
28	0.5335	0.5885	42.586	1.63	159.00
29	0.5875	0.495	42.984	1.58	153.00
30	0.6415	0.4014	42.785	1.59	147.00
31	0.6955	0.3079	42.188	1.66	122.00
32	0.7495	0.2144	40.994	2.77	115.00
33	0.8279	0.2144	36.417	6.04	39.00
34	0.8967	0.2541	33.233	6.04	88.00
35	0.8295	0.2917	24.278	6.39	15.00
36	0.7973	0.2773	21.094	10.85	45.00

37	0.7737	0.3035	21.89	10.83	51.00
38	0.7913	0.3341		10.83	33.00
39	0.8258	0.3267		10.83	40.00
40	0.8967	0.3335	0	10.94	99.00
41	0.8575	0.4014	40.795	7.89	99.00
42	0.7495	0.4014	41.79	2.8	182.00
43	0.8035	0.495	41.79	2.08	172.00
44	0.6955	0.495	42.387	1.86	140.00
45	0.7495	0.5885	42.188	1.88	73.33
46	0.6415	0.5885	42.387	1.92	159.00
47	0.6955	0.682	41.989	2	199.00
48	0.5875	0.682	41.79	1.96	157.00
49	0.6415	0.7756	32.039	3.98	12.00
50	0.6023	0.8435	23.88	3.05	43.00
51	0.5335	0.8832		3	0.00
52	0.4647	0.8435	24.477	2.8	33.00
53	0.505	0.7848		3	0.00
54	0.5335	0.8056	21.492	10	63.00
55	0.562	0.7848	22.089	11	42.00
56	0.5511	0.7513		11	0.00
57	0.5159	0.7513		11	0.00

EXPERIMENTO

5

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	13/06/2011
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:00:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.46
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.21
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	300.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	20.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	20.889	2.34	309.00
2	0.2391	0.2144	20.394	2.28	339.00
3	0.1703	0.3335	20.592	2.32	169.00
4	0.2095	0.4014	18.117	2.24	331.00
5	0.2412	0.328	21.681	2.24	288.00
6	0.2757	0.3353	21.087	2.23	293.00
7	0.2933	0.3048	21.186	2.26	410.00
8	0.2697	0.2786	21.879	2.26	119.00
9	0.2375	0.2929	22.275	2.28	358.00
10	0.3175	0.2144	18.612	2.22	353.00
11	0.4255	0.2144	13.86	2.2	271.00
12	0.3715	0.3079	15.642	2.27	281.00
13	0.3175	0.4014	15.642	2.14	291.00
14	0.2635	0.495	13.563	2.14	449.00
15	0.3175	0.5885	9.504	2.15	434.00
16	0.3715	0.495	11.088	2.15	384.00
17	0.4255	0.4014	11.979	2.16	350.00
18	0.4795	0.3079	11.385	2.14	459.00
19	0.5335	0.2144	10.098	2.19	376.00
20	0.6415	0.2144	6.732	2.26	362.00
21	0.5875	0.3079	8.019	2.19	303.00
22	0.5335	0.4014	8.91	2.19	373.00
23	0.4795	0.495	8.712	2.15	359.00

24	0.4255	0.5885	7.722	2.16	318.00
25	0.3715	0.682	6.435	2.32	305.00
26	0.4255	0.7756	3.663	2.33	348.00
27	0.4795	0.682	4.95	2.29	432.00
28	0.5335	0.5885	6.237	2.27	229.00
29	0.5875	0.495	6.831	2.28	367.00
30	0.6415	0.4014	6.336	2.32	349.00
31	0.6955	0.3079	5.148	2.33	308.00
32	0.7495	0.2144	3.861	2.39	143.00
33	0.8279	0.2144	2.574	2.32	288.00
34	0.8967	0.2541	2.178	2.28	357.00
35	0.8295	0.2917	2.178	2.26	342.00
36	0.7973	0.2773	1.782	2.45	288.00
37	0.7737	0.3035	1.98	2.39	131.00
38	0.7913	0.3341	2.475	2.38	418.00
39	0.8258	0.3267	2.277	2.37	350.00
40	0.8967	0.3335	1.683	2.36	379.00
41	0.8575	0.4014	3.069	2.29	357.00
42	0.7495	0.4014	4.257	2.29	312.00
43	0.8035	0.495	4.455	2.28	390.00
44	0.6955	0.495	5.346	2.3	435.00
45	0.7495	0.5885	4.851	2.28	374.00
46	0.6415	0.5885	5.247	2.28	435.00
47	0.6955	0.682	4.356	2.24	309.00
48	0.5875	0.682	4.158	2.27	431.00
49	0.6415	0.7756	2.97	2.24	417.00
50	0.6023	0.8435	2.178	2.36	239.00
51	0.5335	0.8832	2.178	2.21	396.00
52	0.4647	0.8435	2.475	2.22	332.00
53	0.505	0.7848	1.98	2.32	415.00
54	0.5335	0.8056	1.485	2.29	452.00
55	0.562	0.7848	1.683	2.28	379.00
56	0.5511	0.7513	2.079	2.2	381.00
57	0.5159	0.7513	2.277	2.3	412.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	23.067	2.37	209.00
2	0.2391	0.2144	22.968	2.31	288.00
3	0.1703	0.3335	23.067	2.34	203.00
4	0.2095	0.4014	22.671	2.3	428.00
5	0.2412	0.328	22.77	2.02	49.00
6	0.2757	0.3353	23.067	1.91	60.00
7	0.2933	0.3048	23.067	1.88	57.00
8	0.2697	0.2786	23.067	1.88	45.00
9	0.2375	0.2929	23.067	1.86	55.00
10	0.3175	0.2144	22.869	2.14	298.00
11	0.4255	0.2144	21.582	2.23	344.00
12	0.3715	0.3079	22.275	2.03	369.00
13	0.3175	0.4014	22.077	2.22	229.00
14	0.2635	0.495	21.285	2.52	293.00
15	0.3175	0.5885	19.107	2.39	375.00
16	0.3715	0.495	20.295	2.39	285.00
17	0.4255	0.4014	20.889	2.41	322.00
18	0.4795	0.3079	20.691	2.47	366.00
19	0.5335	0.2144	19.899	2.41	281.00
20	0.6415	0.2144	17.82	2.43	312.00
21	0.5875	0.3079	18.711	2.38	296.00
22	0.5335	0.4014	19.305	2.39	291.00
23	0.4795	0.495	19.008	2.36	414.00
24	0.4255	0.5885	17.82	2.35	334.00
25	0.3715	0.682	16.335	2.49	280.00
26	0.4255	0.7756	13.266	2.41	333.00
27	0.4795	0.682	14.85	2.43	324.00
28	0.5335	0.5885	16.533	2.38	282.00
29	0.5875	0.495	17.325	2.39	234.00
30	0.6415	0.4014	17.325	2.4	293.00
31	0.6955	0.3079	16.731	2.41	280.00
32	0.7495	0.2144	15.741	2.42	256.00
33	0.8279	0.2144	14.652	2.4	243.00
34	0.8967	0.2541	14.256	2.39	216.00
35	0.8295	0.2917	14.355	2.39	281.00
36	0.7973	0.2773	13.761	2.42	242.00

37	0.7737	0.3035	13.959	6.35	80.00
38	0.7913	0.3341	5.346	5.46	116.00
39	0.8258	0.3267	5.247	2.57	308.00
40	0.8967	0.3335	12.573	2.56	200.00
41	0.8575	0.4014	14.85	2.52	292.00
42	0.7495	0.4014	15.84	2.5	317.00
43	0.8035	0.495	15.741	2.46	298.00
44	0.6955	0.495	16.236	2.47	329.00
45	0.7495	0.5885	15.642	2.44	360.00
46	0.6415	0.5885	15.741	2.42	303.00
47	0.6955	0.682	14.652	2.45	296.00
48	0.5875	0.682	14.157	2.43	332.00
49	0.6415	0.7756	12.771	2.48	240.00
50	0.6023	0.8435	11.682	2.43	652.00
51	0.5335	0.8832	11.484	2.43	328.00
52	0.4647	0.8435	11.88	2.43	360.00
53	0.505	0.7848	11.088	2.62	286.00
54	0.5335	0.8056	5.445	2.58	205.00
55	0.562	0.7848	7.623	2.45	396.00
56	0.5511	0.7513	11.682	2.53	250.00
57	0.5159	0.7513	12.276	3.4	202.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	17.919	1.4	158.00
2	0.2391	0.2144	17.82	1.32	144.00
3	0.1703	0.3335	17.82	1.28	118.00
4	0.2095	0.4014	17.127	1.35	80.00
5	0.2412	0.328	18.018	1.18	68.00
6	0.2757	0.3353	17.622	1.02	112.00
7	0.2933	0.3048	17.721	1.1	40.00
8	0.2697	0.2786	18.018	1.07	53.00
9	0.2375	0.2929	18.216	1.06	118.00
10	0.3175	0.2144	17.127	1.19	73.00
11	0.4255	0.2144	15.642	1.59	204.00
12	0.3715	0.3079	16.335	1.15	25.00
13	0.3175	0.4014	16.335	1.1	46.00
14	0.2635	0.495	15.444	1.7	216.00
15	0.3175	0.5885	13.464	1.97	216.00
16	0.3715	0.495	14.454	1.46	81.00
17	0.4255	0.4014	14.85	1.37	96.00
18	0.4795	0.3079	14.454	1.46	148.00
19	0.5335	0.2144	13.464	1.95	65.00
20	0.6415	0.2144	11.088	1.98	57.33
21	0.5875	0.3079	12.276	1.96	166.00
22	0.5335	0.4014	13.167	1.72	54.67
23	0.4795	0.495	12.969	1.77	61.00
24	0.4255	0.5885	12.177	1.93	80.00
25	0.3715	0.682	10.89	1.98	79.00
26	0.4255	0.7756	8.118	1.86	87.00
27	0.4795	0.682	9.603	1.89	186.00
28	0.5335	0.5885	10.791	1.87	88.00
29	0.5875	0.495	11.187	1.86	184.00
30	0.6415	0.4014	10.89	1.9	107.00
31	0.6955	0.3079	9.702	1.88	236.00
32	0.7495	0.2144	8.118	1.97	70.00
33	0.8279	0.2144	6.435	1.99	206.00
34	0.8967	0.2541	5.94	2.02	248.00
35	0.8295	0.2917	6.138	1.96	79.00
36	0.7973	0.2773	4.554	10.72	30.00

37	0.7737	0.3035	6.138	9.75	29.00
38	0.7913	0.3341	3.861	10.91	6.00
39	0.8258	0.3267	4.653	4.1	152.00
40	0.8967	0.3335	7.227	3.85	146.00
41	0.8575	0.4014	16.434	2	318.00
42	0.7495	0.4014	17.523	1.9	328.00
43	0.8035	0.495	17.622	1.8	265.00
44	0.6955	0.495	18.315	1.77	333.00
45	0.7495	0.5885	17.82	1.76	275.00
46	0.6415	0.5885	18.117	1.72	197.00
47	0.6955	0.682	17.127	1.72	354.00
48	0.5875	0.682	16.929	1.73	348.00
49	0.6415	0.7756	15.444	1.72	394.00
50	0.6023	0.8435	14.058	1.78	215.00
51	0.5335	0.8832	13.761	1.78	372.00
52	0.4647	0.8435	14.652	1.78	349.00
53	0.505	0.7848	14.157	5.53	84.00
54	0.5335	0.8056	2.178	2.63	297.00
55	0.562	0.7848	3.861	2.36	267.00
56	0.5511	0.7513	14.85	10.64	13.00
57	0.5159	0.7513	15.147	10.5	47.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	23.067	1.81	233.00
2	0.2391	0.2144	23.067	1.68	259.00
3	0.1703	0.3335	23.067	1.62	170.00
4	0.2095	0.4014	22.968	1.54	161.00
5	0.2412	0.328	23.067	1.3	79.00
6	0.2757	0.3353	23.067	1.24	70.00
7	0.2933	0.3048	22.968	1.19	66.00
8	0.2697	0.2786	23.067	1.16	71.00
9	0.2375	0.2929	23.067	1.14	60.00
10	0.3175	0.2144	22.968	1.28	197.00
11	0.4255	0.2144	22.374	1.44	238.00
12	0.3715	0.3079	22.77	1.22	70.00
13	0.3175	0.4014	22.77	1.5	63.00
14	0.2635	0.495	22.275	1.73	269.00
15	0.3175	0.5885	21.483	1.85	266.00
16	0.3715	0.495	21.879	1.77	207.00
17	0.4255	0.4014	22.275	1.67	220.00
18	0.4795	0.3079	21.978	1.75	282.00
19	0.5335	0.2144	21.582	1.92	275.00
20	0.6415	0.2144	20.394	1.96	225.00
21	0.5875	0.3079	20.988	2.03	229.00
22	0.5335	0.4014	21.384	1.96	226.00
23	0.4795	0.495	21.285	1.96	254.00
24	0.4255	0.5885	20.889	1.98	130.00
25	0.3715	0.682	20.295	1.91	354.00
26	0.4255	0.7756	18.612	1.97	339.00
27	0.4795	0.682	19.503	1.96	313.00
28	0.5335	0.5885	20.295	1.96	245.00
29	0.5875	0.495	20.592	1.98	157.00
30	0.6415	0.4014	20.295	1.88	232.00
31	0.6955	0.3079	19.503	2.02	291.00
32	0.7495	0.2144	18.81	1.95	280.00
33	0.8279	0.2144	16.533	1.99	324.00
34	0.8967	0.2541	15.939	1.96	184.00
35	0.8295	0.2917	16.236	1.96	220.00
36	0.7973	0.2773	3.663	9.37	63.00

37	0.7737	0.3035	2.574	10.29	7.00
38	0.7913	0.3341	16.632	10.75	6.00
39	0.8258	0.3267	10.098	10.84	11.00
40	0.8967	0.3335	3.267	2.51	196.00
41	0.8575	0.4014	17.919	2.24	260.00
42	0.7495	0.4014	19.008	2.23	283.00
43	0.8035	0.495	19.206	2.2	259.00
44	0.6955	0.495	19.8	2.14	274.00
45	0.7495	0.5885	19.602	2.11	364.00
46	0.6415	0.5885	19.8	2.07	252.00
47	0.6955	0.682	19.206	2.08	282.00
48	0.5875	0.682	19.008	2.11	294.00
49	0.6415	0.7756	18.216	1.76	241.00
50	0.6023	0.8435	4.257	1.74	265.00
51	0.5335	0.8832	9.306	1.77	230.00
52	0.4647	0.8435	17.028	1.73	251.00
53	0.505	0.7848	16.533	10.96	18.00
54	0.5335	0.8056	1.188	10.23	68.00
55	0.562	0.7848	1.584	9.78	25.00
56	0.5511	0.7513	17.226	11.02	20.00
57	0.5159	0.7513	17.721	11.06	8.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	23.067	1.52	249.00
2	0.2391	0.2144	23.067	1.45	244.00
3	0.1703	0.3335	23.067	1.4	187.00
4	0.2095	0.4014	22.968	1.35	231.00
5	0.2412	0.328	23.067	1.23	80.00
6	0.2757	0.3353	23.067	1.17	115.00
7	0.2933	0.3048	23.067	1.15	89.00
8	0.2697	0.2786	23.067	1.13	99.00
9	0.2375	0.2929	23.067	1.11	127.00
10	0.3175	0.2144	23.067	1.18	219.00
11	0.4255	0.2144	22.77	1.35	297.00
12	0.3715	0.3079	22.968	1.17	111.00
13	0.3175	0.4014	22.968	1.99	76.00
14	0.2635	0.495	22.77	2.13	190.00
15	0.3175	0.5885	22.077	2.2	326.00
16	0.3715	0.495	22.275	2.08	142.00
17	0.4255	0.4014	22.473	2.02	148.00
18	0.4795	0.3079	22.473	2.05	227.00
19	0.5335	0.2144	22.077	2.22	283.00
20	0.6415	0.2144	21.186	2.31	291.00
21	0.5875	0.3079	21.582	2.27	307.00
22	0.5335	0.4014	21.978	2.26	313.00
23	0.4795	0.495	21.978	2.18	245.00
24	0.4255	0.5885	21.681	2.23	213.00
25	0.3715	0.682	21.384	2.29	346.00
26	0.4255	0.7756	20.295	2.35	261.00
27	0.4795	0.682	20.79	2.27	298.00
28	0.5335	0.5885	21.285	2.26	299.00
29	0.5875	0.495	21.384	2.28	415.00
30	0.6415	0.4014	21.186	2.28	284.00
31	0.6955	0.3079	20.493	2.27	202.00
32	0.7495	0.2144	19.998	2.23	193.00
33	0.8279	0.2144	13.662	2.26	226.00
34	0.8967	0.2541	11.187	2.26	216.00
35	0.8295	0.2917	6.336	2.26	237.00
36	0.7973	0.2773	2.178	8.11	49.00

37	0.7737	0.3035	2.376	10.91	
38	0.7913	0.3341	18.81	11.19	15.00
39	0.8258	0.3267	14.355	11.26	4.00
40	0.8967	0.3335	1.782	3.39	105.00
41	0.8575	0.4014	17.622	2.14	200.00
42	0.7495	0.4014	20.196	2.1	283.00
43	0.8035	0.495	20.493	2.08	238.00
44	0.6955	0.495	20.889	2.05	231.00
45	0.7495	0.5885	20.79	2.03	310.00
46	0.6415	0.5885	20.988	2.06	278.00
47	0.6955	0.682	20.592	1.95	295.00
48	0.5875	0.682	20.493	1.94	182.00
49	0.6415	0.7756	19.305	1.93	239.00
50	0.6023	0.8435	2.673	1.82	236.00
51	0.5335	0.8832	2.376	1.85	308.00
52	0.4647	0.8435	12.375	1.83	310.00
53	0.505	0.7848	18.315	11.29	23.00
54	0.5335	0.8056	1.089	10.98	12.00
55	0.562	0.7848	1.881	10.98	5.00
56	0.5511	0.7513	19.008	11.18	57.00
57	0.5159	0.7513	19.602	11.19	23.00

EXPERIMENTO

6

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	13/06/2011
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:00:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.46
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.21
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	300.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	30.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	29.824	1.91	511.00
2	0.2391	0.2144	29.696	1.88	459.00
3	0.1703	0.3335	29.824	1.91	465.00
4	0.2095	0.4014	27.776	1.92	397.00
5	0.2412	0.328	29.824	1.92	305.00
6	0.2757	0.3353	29.824	1.92	429.00
7	0.2933	0.3048	29.824	1.99	321.00
8	0.2697	0.2786	29.824	1.92	322.00
9	0.2375	0.2929	29.824	1.9	270.00
10	0.3175	0.2144	28.032	1.9	419.00
11	0.4255	0.2144	22.144	1.89	358.00
12	0.3715	0.3079	24.448	1.89	539.00
13	0.3175	0.4014	24.576	1.9	361.00
14	0.2635	0.495	21.888	1.86	746.00
15	0.3175	0.5885	16.768	1.81	398.00
16	0.3715	0.495	18.688	1.89	383.00
17	0.4255	0.4014	19.84	1.9	238.00
18	0.4795	0.3079	18.944	1.86	263.00
19	0.5335	0.2144	17.152	1.92	351.00
20	0.6415	0.2144	12.8	1.91	311.00
21	0.5875	0.3079	14.592	1.95	408.00
22	0.5335	0.4014	15.872	1.94	344.00
23	0.4795	0.495	15.744	1.91	293.00

24	0.4255	0.5885	0	1.88	385.00
25	0.3715	0.682	12.544	1.85	332.00
26	0.4255	0.7756	8.192	1.85	482.00
27	0.4795	0.682	10.112	1.84	274.00
28	0.5335	0.5885	12.16	1.86	372.00
29	0.5875	0.495	12.928	1.9	368.00
30	0.6415	0.4014	12.416	1.94	275.00
31	0.6955	0.3079	10.752	1.98	339.00
32	0.7495	0.2144	8.96	1.98	291.00
33	0.8279	0.2144	7.04	1.97	304.00
34	0.8967	0.2541	6.528	1.95	286.00
35	0.8295	0.2917	6.656	1.98	438.00
36	0.7973	0.2773	5.248	1.95	418.00
37	0.7737	0.3035	5.888	1.94	373.00
38	0.7913	0.3341	6.784	1.94	433.00
39	0.8258	0.3267	6.144	1.94	410.00
40	0.8967	0.3335	5.504	1.93	388.00
41	0.8575	0.4014	7.808	1.95	354.00
42	0.7495	0.4014	9.6	1.94	323.00
43	0.8035	0.495	9.728	1.95	260.00
44	0.6955	0.495	11.008	1.94	331.00
45	0.7495	0.5885	10.24	1.98	289.00
46	0.6415	0.5885	10.752	1.96	308.00
47	0.6955	0.682	9.344	1.98	219.00
48	0.5875	0.682	8.96	1.96	246.00
49	0.6415	0.7756	7.04	1.96	268.00
50	0.6023	0.8435	5.76	1.96	286.00
51	0.5335	0.8832	5.504	1.96	323.00
52	0.4647	0.8435	6.144	1.95	434.00
53	0.505	0.7848	4.48	1.93	408.00
54	0.5335	0.8056	4.224	1.93	300.00
55	0.562	0.7848	4.608	1.92	374.00
56	0.5511	0.7513	5.632	1.92	381.00
57	0.5159	0.7513	5.376	1.92	402.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	29.824	1.35	386.00
2	0.2391	0.2144	29.824	1.21	245.00
3	0.1703	0.3335	29.824	1.34	155.00
4	0.2095	0.4014	29.824	1.3	202.00
5	0.2412	0.328	29.824	1.08	106.00
6	0.2757	0.3353	29.824	0.95	109.00
7	0.2933	0.3048	29.824	0.88	84.00
8	0.2697	0.2786	29.824	0.89	152.00
9	0.2375	0.2929	29.824	0.89	125.00
10	0.3175	0.2144	29.824	1.01	322.00
11	0.4255	0.2144	29.824	1.24	305.00
12	0.3715	0.3079	29.824	0.96	271.00
13	0.3175	0.4014	29.824	1.07	192.00
14	0.2635	0.495	29.824	1.22	363.00
15	0.3175	0.5885	29.824	1.52	477.00
16	0.3715	0.495	29.824	1.31	327.00
17	0.4255	0.4014	29.824	1.19	515.00
18	0.4795	0.3079	29.824	1.27	401.00
19	0.5335	0.2144	29.824	1.6	316.00
20	0.6415	0.2144	28.928	1.7	254.00
21	0.5875	0.3079	29.696	1.82	258.00
22	0.5335	0.4014	29.824	1.63	257.00
23	0.4795	0.495	29.824	1.58	235.00
24	0.4255	0.5885	0	1.65	235.00
25	0.3715	0.682	28.928	1.83	327.00
26	0.4255	0.7756	26.88	1.83	340.00
27	0.4795	0.682	27.904	1.79	219.00
28	0.5335	0.5885	29.056	1.75	236.00
29	0.5875	0.495	29.184	1.89	367.00
30	0.6415	0.4014	28.928	2.31	296.00
31	0.6955	0.3079	28.16	1.91	266.00
32	0.7495	0.2144	27.264	1.86	273.00
33	0.8279	0.2144	26.24	1.87	292.00
34	0.8967	0.2541	26.112	1.96	215.00
35	0.8295	0.2917	26.24	1.89	367.00
36	0.7973	0.2773	25.472	1.79	379.00

37	0.7737	0.3035	25.472	2.05	378.00
38	0.7913	0.3341	25.472	10.96	288.00
39	0.8258	0.3267	25.984	10.97	372.00
40	0.8967	0.3335	16.768	10.16	7.00
41	0.8575	0.4014	26.88	2.04	326.00
42	0.7495	0.4014	27.648	2.04	319.00
43	0.8035	0.495	27.776	1.92	196.00
44	0.6955	0.495	28.288	1.97	303.00
45	0.7495	0.5885	28.032	1.91	201.00
46	0.6415	0.5885	28.288	1.9	283.00
47	0.6955	0.682	27.776	1.78	314.00
48	0.5875	0.682	27.648	1.77	300.00
49	0.6415	0.7756	26.88	1.82	236.00
50	0.6023	0.8435	25.984	1.84	234.00
51	0.5335	0.8832	25.728	1.87	257.00
52	0.4647	0.8435	25.856	1.9	434.00
53	0.505	0.7848	22.016	11.12	161.00
54	0.5335	0.8056	23.424	11.16	54.00
55	0.562	0.7848	15.232	10.65	7.00
56	0.5511	0.7513	26.496	9.16	207.00
57	0.5159	0.7513	26.112	1.97	350.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	29.696	1.2	321.00
2	0.2391	0.2144	29.824	1.12	217.00
3	0.1703	0.3335	29.824	1.11	197.00
4	0.2095	0.4014	29.824	1.1	185.00
5	0.2412	0.328	29.824	1.03	129.00
6	0.2757	0.3353	29.824	0.98	111.00
7	0.2933	0.3048	29.824	0.92	102.00
8	0.2697	0.2786	29.824	0.92	90.00
9	0.2375	0.2929	29.824	0.91	129.00
10	0.3175	0.2144	29.824	0.99	183.00
11	0.4255	0.2144	29.44	1.04	440.00
12	0.3715	0.3079	29.824	1.04	216.00
13	0.3175	0.4014	29.824	1.27	136.00
14	0.2635	0.495	29.696	1.22	480.00
15	0.3175	0.5885	27.904	1.32	283.00
16	0.3715	0.495	28.672	1.24	298.00
17	0.4255	0.4014	28.928	1.21	365.00
18	0.4795	0.3079	28.544	1.21	252.00
19	0.5335	0.2144	27.776	1.42	408.00
20	0.6415	0.2144	25.984	1.66	439.00
21	0.5875	0.3079	26.88	1.44	350.00
22	0.5335	0.4014	27.264	1.35	269.00
23	0.4795	0.495	27.392	1.3	380.00
24	0.4255	0.5885	0	1.31	283.00
25	0.3715	0.682	26.112	1.6	399.00
26	0.4255	0.7756	24.192	1.69	313.00
27	0.4795	0.682	25.216	1.57	241.00
28	0.5335	0.5885	26.112	1.57	281.00
29	0.5875	0.495	26.368	1.57	396.00
30	0.6415	0.4014	25.984	1.61	375.00
31	0.6955	0.3079	25.344	1.66	359.00
32	0.7495	0.2144	24.32	1.84	291.00
33	0.8279	0.2144	23.04	1.91	398.00
34	0.8967	0.2541	22.784	1.87	363.00
35	0.8295	0.2917	22.784	1.89	292.00
36	0.7973	0.2773	22.144	2.22	257.00

37	0.7737	0.3035	22.144	10.75	259.00
38	0.7913	0.3341	23.296	11.02	399.00
39	0.8258	0.3267	23.04	11.16	243.00
40	0.8967	0.3335	14.208	10.05	60.00
41	0.8575	0.4014	23.68	2	306.00
42	0.7495	0.4014	24.832	2.03	351.00
43	0.8035	0.495	24.832	1.98	186.00
44	0.6955	0.495	25.472	2	286.00
45	0.7495	0.5885	25.216	1.96	243.00
46	0.6415	0.5885	25.472	1.98	415.00
47	0.6955	0.682	24.96	1.9	321.00
48	0.5875	0.682	24.96	1.94	295.00
49	0.6415	0.7756	23.808	1.94	187.00
50	0.6023	0.8435	22.912	2.1	290.00
51	0.5335	0.8832	22.784	2.11	293.00
52	0.4647	0.8435	23.296	2.09	298.00
53	0.505	0.7848	22.656	1.94	241.00
54	0.5335	0.8056	18.944	10.73	52.00
55	0.562	0.7848	8.832	11.06	9.00
56	0.5511	0.7513	23.808	3.16	252.00
57	0.5159	0.7513	24.192	1.86	274.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	29.824	1.33	237.00
2	0.2391	0.2144	29.696	1.31	219.00
3	0.1703	0.3335	29.824	1.3	165.00
4	0.2095	0.4014	29.696	1.27	233.00
5	0.2412	0.328	29.824	1.19	127.00
6	0.2757	0.3353	29.824	1.16	32.00
7	0.2933	0.3048	29.824	1.11	56.00
8	0.2697	0.2786	29.824	1.07	69.00
9	0.2375	0.2929	29.824	1.06	126.00
10	0.3175	0.2144	29.696	1.13	218.00
11	0.4255	0.2144	29.056	1.21	387.00
12	0.3715	0.3079	29.44	1.14	179.00
13	0.3175	0.4014	29.44	1.12	142.00
14	0.2635	0.495	28.8	1.1	217.00
15	0.3175	0.5885	27.264	1.16	392.00
16	0.3715	0.495	28.16	1.13	320.00
17	0.4255	0.4014	28.416	1.1	908.00
18	0.4795	0.3079	28.16	1.16	306.00
19	0.5335	0.2144	27.392	1.21	358.00
20	0.6415	0.2144	25.856	1.33	247.00
21	0.5875	0.3079	26.496	1.28	301.00
22	0.5335	0.4014	27.008	1.24	449.00
23	0.4795	0.495	27.136	1.24	299.00
24	0.4255	0.5885	0	1.24	246.00
25	0.3715	0.682	25.856	1.32	417.00
26	0.4255	0.7756	23.936	1.48	217.00
27	0.4795	0.682	24.96	1.35	316.00
28	0.5335	0.5885	25.6	1.35	203.00
29	0.5875	0.495	25.984	1.35	271.00
30	0.6415	0.4014	25.6	1.36	346.00
31	0.6955	0.3079	25.088	1.33	289.00
32	0.7495	0.2144	24.192	1.61	275.00
33	0.8279	0.2144	22.784	1.95	279.00
34	0.8967	0.2541	22.784	4.57	358.00
35	0.8295	0.2917	22.912	7.38	267.00
36	0.7973	0.2773	22.144	10.56	246.00

37	0.7737	0.3035	18.432	10.88	82.00
38	0.7913	0.3341	23.296	2.4	192.00
39	0.8258	0.3267	18.688	11.01	31.00
40	0.8967	0.3335	18.816	10.97	38.00
41	0.8575	0.4014	23.424	2.23	281.00
42	0.7495	0.4014	24.576	1.93	316.00
43	0.8035	0.495	24.576	2.21	225.00
44	0.6955	0.495	25.088	1.89	419.00
45	0.7495	0.5885	24.832	1.93	252.00
46	0.6415	0.5885	25.088	1.85	372.00
47	0.6955	0.682	24.576	1.89	293.00
48	0.5875	0.682	24.448	1.72	311.00
49	0.6415	0.7756	23.296	2.14	202.00
50	0.6023	0.8435	22.528	5.4	188.00
51	0.5335	0.8832	22.4	2.38	181.00
52	0.4647	0.8435	22.912	2.69	345.00
53	0.505	0.7848	22.4	5.01	17.00
54	0.5335	0.8056	12.8	10.93	12.00
55	0.562	0.7848	14.848	10.65	18.00
56	0.5511	0.7513	22.784	1.92	247.00
57	0.5159	0.7513	23.296	1.63	277.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	29.696	1.15	370.00
2	0.2391	0.2144	29.824	1.01	260.00
3	0.1703	0.3335	29.824	0.99	213.00
4	0.2095	0.4014	29.824	0.93	200.00
5	0.2412	0.328	29.824	0.84	144.00
6	0.2757	0.3353	29.824	0.75	59.00
7	0.2933	0.3048	29.824	0.77	12.00
8	0.2697	0.2786	29.824	0.78	55.00
9	0.2375	0.2929	29.824	0.75	46.00
10	0.3175	0.2144	29.824	0.81	
11	0.4255	0.2144	29.824	0.89	223.00
12	0.3715	0.3079	29.824	0.86	190.00
13	0.3175	0.4014	29.824	1.06	181.00
14	0.2635	0.495	29.824	1.06	187.00
15	0.3175	0.5885	29.184	1.13	483.00
16	0.3715	0.495	29.696	1.09	320.00
17	0.4255	0.4014	29.824	1.06	258.00
18	0.4795	0.3079	29.696	1.08	
19	0.5335	0.2144	29.056	1.17	372.00
20	0.6415	0.2144	27.776	1.29	270.00
21	0.5875	0.3079	28.416	1.21	231.00
22	0.5335	0.4014	28.928	1.18	344.00
23	0.4795	0.495	29.056	1.15	
24	0.4255	0.5885	0	1.17	369.00
25	0.3715	0.682	28.032	1.33	321.00
26	0.4255	0.7756	26.112	1.45	228.00
27	0.4795	0.682	27.264	1.37	358.00
28	0.5335	0.5885	27.776	1.39	230.00
29	0.5875	0.495	28.16	1.39	
30	0.6415	0.4014	27.392	1.37	131.00
31	0.6955	0.3079	27.264	1.38	
32	0.7495	0.2144	26.496	1.62	272.00
33	0.8279	0.2144	25.088	2.14	199.00
34	0.8967	0.2541	25.088	2.46	305.00
35	0.8295	0.2917	25.344	2.79	254.00
36	0.7973	0.2773	23.296	10.41	125.00

37	0.7737	0.3035	13.44	10.74	29.00
38	0.7913	0.3341	24.96	1.85	127.00
39	0.8258	0.3267	11.392	10.56	22.00
40	0.8967	0.3335	15.104	11.04	
41	0.8575	0.4014	25.728	2.99	397.00
42	0.7495	0.4014	26.752	1.9	
43	0.8035	0.495	26.752	2.05	305.00
44	0.6955	0.495	27.136	1.82	313.00
45	0.7495	0.5885	27.008	2.02	
46	0.6415	0.5885	27.392	1.77	236.00
47	0.6955	0.682	26.88	1.96	
48	0.5875	0.682	26.752	1.77	300.00
49	0.6415	0.7756	25.856	11.87	193.00
50	0.6023	0.8435	25.088	7.67	122.00
51	0.5335	0.8832	24.96	4.95	168.00
52	0.4647	0.8435	25.216	4.68	298.00
53	0.505	0.7848	25.088	2.16	289.00
54	0.5335	0.8056	7.936	11.03	91.00
55	0.562	0.7848	7.936	10.92	23.00
56	0.5511	0.7513	25.088	1.65	5.00
57	0.5159	0.7513	25.6	1.52	264.00

EXPERIMENTO

7

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	04/03/2011
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:00:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.46
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.21
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	300.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	40.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	39.44	1.92	384.67
2	0.2391	0.2144	39.44	1.82	398.00
3	0.1703	0.3335	39.61	1.78	367.00
4	0.2095	0.4014	39.44	1.78	461.00
5	0.2412	0.328	39.61	1.77	421.00
6	0.2757	0.3353	39.61	1.79	325.00
7	0.2933	0.3048	39.44	1.73	335.00
8	0.2697	0.2786	39.61	2.07	320.00
9	0.2375	0.2929	39.61	1.76	458.00
10	0.3175	0.2144	39.44	1.74	423.00
11	0.4255	0.2144	39.61	1.75	466.00
12	0.3715	0.3079	39.44	1.75	369.00
13	0.3175	0.4014	39.61	1.75	437.00
14	0.2635	0.495	39.61	1.62	481.00
15	0.3175	0.5885	30.77	1.71	468.00
16	0.3715	0.495	35.19	1.77	671.00
17	0.4255	0.4014	36.89	1.79	341.00
18	0.4795	0.3079	34.17	1.78	411.00
19	0.5335	0.2144	29.92	1.64	354.00
20	0.6415	0.2144	21.08	1.79	477.00
21	0.5875	0.3079	24.65	1.81	518.00
22	0.5335	0.4014	27.71	1.79	446.00
23	0.4795	0.495	27.71	1.77	422.00

24	0.4255	0.5885	24.99	1.68	247.00
25	0.3715	0.682	20.57	1.95	514.00
26	0.4255	0.7756	10.71	1.82	524.00
27	0.4795	0.682	15.13	1.84	534.00
28	0.5335	0.5885	19.72	1.83	497.00
29	0.5875	0.495	21.25	1.86	651.00
30	0.6415	0.4014	20.06	1.86	451.00
31	0.6955	0.3079	16.83	1.99	541.00
32	0.7495	0.2144	13.6	1.86	516.00
33	0.8279	0.2144	9.52	1.88	378.00
34	0.8967	0.2541	8.33	1.82	381.00
35	0.8295	0.2917	8.5	1.8	588.00
36	0.7973	0.2773	6.63	1.8	487.00
37	0.7737	0.3035	7.48	1.9	762.00
38	0.7913	0.3341	8.84	1.86	404.00
39	0.8258	0.3267	7.65	1.87	683.00
40	0.8967	0.3335	6.63	1.8	435.00
41	0.8575	0.4014	10.71	1.76	538.00
42	0.7495	0.4014	14.11	1.77	507.00
43	0.8035	0.495	14.45	1.65	480.00
44	0.6955	0.495	16.83	1.77	230.00
45	0.7495	0.5885	15.47	1.78	514.00
46	0.6415	0.5885	16.49	1.72	431.00
47	0.6955	0.682	13.26	1.75	545.00
48	0.5875	0.682	12.58	1.75	506.00
49	0.6415	0.7756	8.84	1.7	351.00
50	0.6023	0.8435	6.63	1.64	317.00
51	0.5335	0.8832	6.63	1.69	411.00
52	0.4647	0.8435	7.31	1.69	359.00
53	0.505	0.7848	5.44	1.71	400.00
54	0.5335	0.8056	4.59	1.92	609.00
55	0.562	0.7848	4.93	2.21	480.00
56	0.5511	0.7513	6.29	1.76	453.00
57	0.5159	0.7513	6.46	1.75	528.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	39.44	1.66	281.00
2	0.2391	0.2144	39.61	1.61	178.00
3	0.1703	0.3335	39.61	1.61	257.00
4	0.2095	0.4014	39.44	1.58	223.00
5	0.2412	0.328	39.61	1.48	120.00
6	0.2757	0.3353	39.61	1.46	171.00
7	0.2933	0.3048	39.44	1.44	115.00
8	0.2697	0.2786	39.61	1.42	120.00
9	0.2375	0.2929	39.61	1.4	148.00
10	0.3175	0.2144	39.44	1.47	224.00
11	0.4255	0.2144	39.61	1.68	373.00
12	0.3715	0.3079	39.61	1.46	144.00
13	0.3175	0.4014	39.44	1.47	113.00
14	0.2635	0.495	39.61	1.67	564.00
15	0.3175	0.5885	39.61	1.71	480.00
16	0.3715	0.495	39.44	1.69	439.00
17	0.4255	0.4014	39.61	1.55	311.00
18	0.4795	0.3079	39.61	1.82	482.00
19	0.5335	0.2144	39.44	1.72	308.00
20	0.6415	0.2144	39.61	1.86	335.00
21	0.5875	0.3079	39.61	2.09	423.00
22	0.5335	0.4014	39.44	1.8	307.00
23	0.4795	0.495	39.61	1.85	466.00
24	0.4255	0.5885	39.61	1.81	413.00
25	0.3715	0.682	39.44	2	517.00
26	0.4255	0.7756	39.61	2.04	666.00
27	0.4795	0.682	39.61	1.99	489.00
28	0.5335	0.5885	39.44	2	495.00
29	0.5875	0.495	39.61	1.92	677.00
30	0.6415	0.4014	39.61	1.99	454.00
31	0.6955	0.3079	39.61	2	466.00
32	0.7495	0.2144	39.61	1.93	397.00
33	0.8279	0.2144	37.4	1.97	325.00
34	0.8967	0.2541	36.89	1.91	355.00
35	0.8295	0.2917	37.23	1.78	441.00
36	0.7973	0.2773	35.19	10.72	27.00

37	0.7737	0.3035	21.59	11.03	38.00
38	0.7913	0.3341	36.55	1.84	457.00
39	0.8258	0.3267	33.49	2.25	548.00
40	0.8967	0.3335	18.87	10.84	21.00
41	0.8575	0.4014	39.1	1.96	458.00
42	0.7495	0.4014	39.61	2	446.00
43	0.8035	0.495	39.61	2.01	479.00
44	0.6955	0.495	39.61	2.06	380.00
45	0.7495	0.5885	39.61	2.04	479.00
46	0.6415	0.5885	39.61	2.04	455.00
47	0.6955	0.682	39.44	1.93	640.00
48	0.5875	0.682	39.61	2	505.00
49	0.6415	0.7756	39.61	1.93	364.00
50	0.6023	0.8435	37.74	1.79	300.00
51	0.5335	0.8832	37.74	1.92	452.00
52	0.4647	0.8435	38.93	1.83	355.00
53	0.505	0.7848	32.13	9.69	196.00
54	0.5335	0.8056	35.36	2.71	151.00
55	0.562	0.7848	34.51	4.76	114.00
56	0.5511	0.7513	26.35	11.07	41.00
57	0.5159	0.7513	39.44	2.1	417.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	39.44	1.46	154.00
2	0.2391	0.2144	39.44	1.35	144.00
3	0.1703	0.3335	39.61	1.31	153.00
4	0.2095	0.4014	39.61	1.29	151.00
5	0.2412	0.328	39.44	1.21	118.00
6	0.2757	0.3353	39.61	1.17	129.00
7	0.2933	0.3048	39.61	1.14	122.00
8	0.2697	0.2786	39.44	1.13	88.00
9	0.2375	0.2929	39.61	1.15	136.00
10	0.3175	0.2144	39.61	1.2	132.00
11	0.4255	0.2144	39.61	1.35	184.00
12	0.3715	0.3079	39.61	1.21	122.00
13	0.3175	0.4014	39.61	1.18	115.00
14	0.2635	0.495	39.61	1.32	228.00
15	0.3175	0.5885	39.61	1.58	412.00
16	0.3715	0.495	39.44	1.47	277.00
17	0.4255	0.4014	39.61	1.37	172.00
18	0.4795	0.3079	39.61	1.33	253.00
19	0.5335	0.2144	39.44	1.58	349.00
20	0.6415	0.2144	39.61	1.74	362.00
21	0.5875	0.3079	39.61	1.65	314.00
22	0.5335	0.4014	39.44	1.62	376.00
23	0.4795	0.495	39.61	1.6	526.00
24	0.4255	0.5885	39.61	1.65	312.00
25	0.3715	0.682	39.44	1.99	468.00
26	0.4255	0.7756	39.61	1.96	356.00
27	0.4795	0.682	39.61	1.86	529.00
28	0.5335	0.5885	39.44	1.93	348.00
29	0.5875	0.495	39.61	1.93	451.00
30	0.6415	0.4014	39.61	1.92	331.00
31	0.6955	0.3079	39.44	1.85	505.00
32	0.7495	0.2144	39.61	1.96	305.00
33	0.8279	0.2144	39.61	2	259.00
34	0.8967	0.2541	39.61	1.97	293.00
35	0.8295	0.2917	39.61	2.06	347.00
36	0.7973	0.2773	19.72	10.92	20.00

37	0.7737	0.3035	34.34	10.51	106.00
38	0.7913	0.3341	39.61	2.11	925.00
39	0.8258	0.3267	36.55	2.64	446.00
40	0.8967	0.3335	15.13	11.11	44.00
41	0.8575	0.4014	39.61	2.11	351.00
42	0.7495	0.4014	39.44	2.11	458.00
43	0.8035	0.495	39.61	2.04	429.00
44	0.6955	0.495	39.61	2.05	450.00
45	0.7495	0.5885	39.61	1.87	488.00
46	0.6415	0.5885	39.61	1.94	356.00
47	0.6955	0.682	39.61	1.97	587.00
48	0.5875	0.682	39.61	1.91	424.00
49	0.6415	0.7756	39.61	1.8	484.00
50	0.6023	0.8435	39.61	1.89	282.00
51	0.5335	0.8832	39.61	1.77	352.00
52	0.4647	0.8435	39.61	1.77	282.00
53	0.505	0.7848	39.61	2.04	455.00
54	0.5335	0.8056	13.6	11	17.00
55	0.562	0.7848	12.92	10.79	13.00
56	0.5511	0.7513	39.61	2.06	594.00
57	0.5159	0.7513	39.61	2.01	400.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	39.44	1.52	145.00
2	0.2391	0.2144	39.61	1.41	132.00
3	0.1703	0.3335	39.44	1.34	113.00
4	0.2095	0.4014	39.61	1.32	132.00
5	0.2412	0.328	0	1.24	128.00
6	0.2757	0.3353	39.61	1.17	118.00
7	0.2933	0.3048	39.61	1.16	118.00
8	0.2697	0.2786	39.44	1.13	80.00
9	0.2375	0.2929	39.61	1.13	113.00
10	0.3175	0.2144	39.61	1.17	111.00
11	0.4255	0.2144	39.44	1.25	165.00
12	0.3715	0.3079	39.61	1.17	132.00
13	0.3175	0.4014	39.61	1.2	128.00
14	0.2635	0.495	39.61	1.29	173.00
15	0.3175	0.5885	39.61	1.48	409.00
16	0.3715	0.495	39.44	1.28	132.00
17	0.4255	0.4014	39.61	1.27	126.00
18	0.4795	0.3079	39.61	1.32	90.00
19	0.5335	0.2144	39.61	1.47	255.00
20	0.6415	0.2144	39.61	1.63	246.00
21	0.5875	0.3079	39.44	1.43	272.00
22	0.5335	0.4014	39.61	1.33	248.00
23	0.4795	0.495	39.61	1.45	366.00
24	0.4255	0.5885	39.44	1.44	244.00
25	0.3715	0.682	39.61	2.2	459.00
26	0.4255	0.7756	39.44	1.97	341.00
27	0.4795	0.682	39.61	1.89	360.00
28	0.5335	0.5885	39.61	1.84	272.00
29	0.5875	0.495	39.44	1.82	408.00
30	0.6415	0.4014	39.61	1.76	275.00
31	0.6955	0.3079	39.61	1.78	301.00
32	0.7495	0.2144	39.44	1.79	330.00
33	0.8279	0.2144	39.61	1.94	210.00
34	0.8967	0.2541	39.61	2.06	194.00
35	0.8295	0.2917	39.61	2.15	161.00
36	0.7973	0.2773	7.48	10.94	20.00

37	0.7737	0.3035	39.44	4.34	239.00
38	0.7913	0.3341	39.61	2.16	271.00
39	0.8258	0.3267	39.61	5.22	528.00
40	0.8967	0.3335	5.95	11.08	22.00
41	0.8575	0.4014	39.61	1.93	220.00
42	0.7495	0.4014	39.61	1.96	453.00
43	0.8035	0.495	39.44	1.92	435.00
44	0.6955	0.495	39.61	1.94	361.00
45	0.7495	0.5885	39.61	1.89	353.00
46	0.6415	0.5885	39.61	1.95	374.00
47	0.6955	0.682	39.61	1.93	459.00
48	0.5875	0.682	39.44	1.92	399.00
49	0.6415	0.7756	39.61	2.03	366.00
50	0.6023	0.8435	39.61	2	203.00
51	0.5335	0.8832	39.44	1.92	232.00
52	0.4647	0.8435	39.61	2.06	141.00
53	0.505	0.7848	39.61	1.9	327.00
54	0.5335	0.8056	10.2	10.76	12.00
55	0.562	0.7848	9.18	11	22.00
56	0.5511	0.7513	39.44	2.19	237.00
57	0.5159	0.7513	39.61	2.03	373.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	39.61	1.39	111.00
2	0.2391	0.2144	39.44	1.31	131.00
3	0.1703	0.3335	39.61	1.27	192.00
4	0.2095	0.4014	39.61	1.25	167.00
5	0.2412	0.328	0	1.17	124.00
6	0.2757	0.3353	39.61	1.13	92.00
7	0.2933	0.3048	39.61	1.11	102.00
8	0.2697	0.2786	39.44	1.12	98.00
9	0.2375	0.2929	39.61	1.11	101.00
10	0.3175	0.2144	39.61	1.14	135.00
11	0.4255	0.2144	39.44	1.21	165.00
12	0.3715	0.3079	39.61	1.15	87.00
13	0.3175	0.4014	39.61	1.25	136.00
14	0.2635	0.495	39.61	1.3	160.00
15	0.3175	0.5885	39.61	1.38	199.00
16	0.3715	0.495	39.61	1.32	122.00
17	0.4255	0.4014	39.61	1.31	137.00
18	0.4795	0.3079	39.61	1.34	102.00
19	0.5335	0.2144	39.44	1.44	123.00
20	0.6415	0.2144	39.61	1.55	211.00
21	0.5875	0.3079	39.61	1.45	108.00
22	0.5335	0.4014	39.44	1.44	167.00
23	0.4795	0.495	39.61	1.47	269.00
24	0.4255	0.5885	39.61	1.57	266.00
25	0.3715	0.682	39.44	1.86	293.00
26	0.4255	0.7756	39.61	1.88	316.00
27	0.4795	0.682	39.61	2.42	230.00
28	0.5335	0.5885	39.44	1.79	364.00
29	0.5875	0.495	39.61	1.75	295.00
30	0.6415	0.4014	39.61	1.72	307.00
31	0.6955	0.3079	39.44	1.68	276.00
32	0.7495	0.2144	39.61	1.72	190.00
33	0.8279	0.2144	39.61	2.09	134.00
34	0.8967	0.2541	36.38	3.86	3.00
35	0.8295	0.2917	25.16	3.5	12.00
36	0.7973	0.2773	4.25	11.01	9.00

37	0.7737	0.3035	39.44	2.35	228.00
38	0.7913	0.3341	39.61	2.13	270.00
39	0.8258	0.3267	39.61	2.22	472.00
40	0.8967	0.3335	4.25	11.13	24.00
41	0.8575	0.4014	39.61	2.25	190.00
42	0.7495	0.4014	39.61	2.06	389.00
43	0.8035	0.495	39.44	2.07	324.00
44	0.6955	0.495	39.61	2.05	445.00
45	0.7495	0.5885	39.61	1.98	339.00
46	0.6415	0.5885	39.44	2	402.00
47	0.6955	0.682	39.61	2.03	273.00
48	0.5875	0.682	39.61	1.99	483.00
49	0.6415	0.7756	39.61	2.06	246.00
50	0.6023	0.8435	39.61	2.11	76.00
51	0.5335	0.8832	39.61	2.22	79.00
52	0.4647	0.8435	39.61	2.16	189.00
53	0.505	0.7848	39.61	2.07	389.00
54	0.5335	0.8056	7.82	11	29.00
55	0.562	0.7848	9.35	11.02	27.00
56	0.5511	0.7513	39.61	2.11	227.00
57	0.5159	0.7513	39.61	11.92	338.00

CONDICIONES INICIALES

FECHA DE INICIO DE EXPERIMENTO	14/02/2011
HORA DE INICIO DEL EXPERIMENTO	12:00:00
CONTENIDO DE SILICA, Kg	8.59
CONTENIDO DE SOLUCIÓN, L	8.33
CONCENTRACIÓN INICIAL , mg/L	300.00
VOLTAJE APLICADO ENTRE ELECTRODOS, V	50.00

0 HORAS

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	40.194	1.91	414.00
2	0.2391	0.2144	39.402	1.88	253.00
3	0.1703	0.3335	39.402	1.91	504.00
4	0.2095	0.4014	35.442	1.92	353.00
5	0.2412	0.328	41.58	1.92	338.00
6	0.2757	0.3353	40.194	1.92	186.00
7	0.2933	0.3048	40.392	1.99	362.00
8	0.2697	0.2786	41.58	1.92	392.00
9	0.2375	0.2929	42.372	1.9	391.00
10	0.3175	0.2144	35.64	1.9	355.00
11	0.4255	0.2144	27.72	1.89	386.00
12	0.3715	0.3079	31.284	1.89	478.00
13	0.3175	0.4014	31.284	1.9	325.00
14	0.2635	0.495	27.324	1.86	312.00
15	0.3175	0.5885	20.196	1.81	376.00
16	0.3715	0.495	23.166	1.89	562.00
17	0.4255	0.4014	24.552	1.9	531.00
18	0.4795	0.3079	23.562	1.86	530.00
19	0.5335	0.2144	20.79	1.92	409.00
20	0.6415	0.2144	14.256	1.91	483.00
21	0.5875	0.3079	16.83	1.95	283.00
22	0.5335	0.4014	18.81	1.94	537.00
23	0.4795	0.495	18.612	1.91	521.00

24	0.4255	0.5885	16.83	1.88	565.00
25	0.3715	0.682	14.256	1.85	477.00
26	0.4255	0.7756	8.514	1.85	418.00
27	0.4795	0.682	10.89	1.84	417.00
28	0.5335	0.5885	13.464	1.86	368.00
29	0.5875	0.495	14.652	1.9	306.00
30	0.6415	0.4014	13.464	1.64	395.00
31	0.6955	0.3079	10.89	1.98	303.00
32	0.7495	0.2144	8.514	1.98	466.00
33	0.8279	0.2144	5.742	1.97	397.00
34	0.8967	0.2541	5.148	1.95	381.00
35	0.8295	0.2917	5.346	1.98	428.00
36	0.7973	0.2773	3.96	1.95	463.00
37	0.7737	0.3035	4.554	1.94	350.00
38	0.7913	0.3341	5.148	1.94	328.00
39	0.8258	0.3267	4.95	1.94	268.00
40	0.8967	0.3335	3.96	1.93	362.00
41	0.8575	0.4014	6.732	1.95	398.00
42	0.7495	0.4014	9.306	1.94	381.00
43	0.8035	0.495	9.702	1.95	301.00
44	0.6955	0.495	11.484	1.94	332.00
45	0.7495	0.5885	10.494	1.98	450.00
46	0.6415	0.5885	11.484	1.96	307.00
47	0.6955	0.682	9.702	1.98	440.00
48	0.5875	0.682	9.306	1.96	510.00
49	0.6415	0.7756	7.128	1.96	413.00
50	0.6023	0.8435	5.742	1.96	369.00
51	0.5335	0.8832	5.544	1.96	514.00
52	0.4647	0.8435	6.138	1.95	514.00
53	0.505	0.7848	4.95	1.93	309.00
54	0.5335	0.8056	4.356	1.93	320.00
55	0.562	0.7848	4.95	1.92	349.00
56	0.5511	0.7513	5.346	1.92	460.00
57	0.5159	0.7513	5.94	1.92	345.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	45.936	1.35	312.00
2	0.2391	0.2144	45.936	1.21	259.00
3	0.1703	0.3335	45.936	1.34	368.00
4	0.2095	0.4014	44.748	1.3	307.00
5	0.2412	0.328	46.134	1.08	201.00
6	0.2757	0.3353	46.134	0.95	211.00
7	0.2933	0.3048	45.936	0.88	151.00
8	0.2697	0.2786	46.134	0.89	181.00
9	0.2375	0.2929	46.134	0.89	283.00
10	0.3175	0.2144	44.748	1.01	317.00
11	0.4255	0.2144	40.788	1.24	262.00
12	0.3715	0.3079	42.768	0.96	244.00
13	0.3175	0.4014	42.768	1.07	189.00
14	0.2635	0.495	40.788	1.22	341.00
15	0.3175	0.5885	34.848	1.52	504.00
16	0.3715	0.495	38.016	1.31	411.00
17	0.4255	0.4014	39.204	1.19	214.00
18	0.4795	0.3079	38.214	1.27	502.00
19	0.5335	0.2144	35.442	1.6	396.00
20	0.6415	0.2144	28.512	1.7	357.00
21	0.5875	0.3079	31.878	1.82	393.00
22	0.5335	0.4014	34.254	1.63	520.00
23	0.4795	0.495	34.056	1.58	501.00
24	0.4255	0.5885	31.482	1.65	594.00
25	0.3715	0.682	27.918	1.83	459.00
26	0.4255	0.7756	20.988	1.83	483.00
27	0.4795	0.682	23.958	1.75	734.00
28	0.5335	0.5885	27.522	1.75	645.00
29	0.5875	0.495	29.106	1.89	535.00
30	0.6415	0.4014	27.918	2.31	629.00
31	0.6955	0.3079	24.552	1.91	258.00
32	0.7495	0.2144	21.582	1.86	370.00
33	0.8279	0.2144	17.622	1.87	373.00
34	0.8967	0.2541	16.434	1.96	282.00
35	0.8295	0.2917	16.632	1.89	434.00
36	0.7973	0.2773	14.652	1.79	430.00

37	0.7737	0.3035	14.058	2.05	222.00
38	0.7913	0.3341	16.632	10.96	16.00
39	0.8258	0.3267	14.058	10.97	23.00
40	0.8967	0.3335	13.86	10.16	66.00
41	0.8575	0.4014	18.81	2.04	346.00
42	0.7495	0.4014	22.176	2.04	391.00
43	0.8035	0.495	22.374	1.92	478.00
44	0.6955	0.495	24.948	1.97	308.00
45	0.7495	0.5885	23.562	1.91	328.00
46	0.6415	0.5885	24.75	1.9	396.00
47	0.6955	0.682	22.374	1.78	487.00
48	0.5875	0.682	21.78	1.77	511.00
49	0.6415	0.7756	18.81	1.82	378.40
50	0.6023	0.8435	16.632	1.84	467.00
51	0.5335	0.8832	16.434	1.87	361.00
52	0.4647	0.8435	17.424	1.9	368.00
53	0.505	0.7848	14.652	11.12	70.00
54	0.5335	0.8056	14.058	11.16	48.00
55	0.562	0.7848	14.256	10.65	91.00
56	0.5511	0.7513	15.642	9.16	213.00
57	0.5159	0.7513	16.038	1.97	454.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	44.352	1.2	273.00
2	0.2391	0.2144	44.352	1.12	209.00
3	0.1703	0.3335	44.55	1.11	252.00
4	0.2095	0.4014	44.6	1.1	221.00
5	0.2412	0.328	44.946	1.03	133.00
6	0.2757	0.3353	44.55	0.98	107.00
7	0.2933	0.3048	44.55	0.92	135.00
8	0.2697	0.2786	45.144	0.92	149.00
9	0.2375	0.2929	45.54	0.91	136.00
10	0.3175	0.2144	43.362	0.99	222.00
11	0.4255	0.2144	40.194	1.04	225.00
12	0.3715	0.3079	41.58	1.04	192.00
13	0.3175	0.4014	41.382	1.27	212.00
14	0.2635	0.495	39.6	1.23	218.00
15	0.3175	0.5885	35.442	1.32	322.00
16	0.3715	0.495	37.422	1.24	202.00
17	0.4255	0.4014	38.412	1.21	223.00
18	0.4795	0.3079	37.818	1.21	178.00
19	0.5335	0.2144	36.234	1.42	288.00
20	0.6415	0.2144	31.284	1.66	471.00
21	0.5875	0.3079	33.858	1.44	305.00
22	0.5335	0.4014	35.244	1.35	363.00
23	0.4795	0.495	34.848	1.3	277.00
24	0.4255	0.5885	32.868	1.31	276.00
25	0.3715	0.682	30.294	1.6	419.00
26	0.4255	0.7756	24.354	1.69	383.00
27	0.4795	0.682	27.126	1.57	450.00
28	0.5335	0.5885	30.096	1.57	385.00
29	0.5875	0.495	31.878	1.57	453.00
30	0.6415	0.4014	31.086	1.61	473.00
31	0.6955	0.3079	28.314	1.66	185.00
32	0.7495	0.2144	25.74	1.84	354.00
33	0.8279	0.2144	21.384	1.91	300.00
34	0.8967	0.2541	19.008	1.87	348.00
35	0.8295	0.2917	19.602	1.89	275.00
36	0.7973	0.2773	15.246	2.22	126.00

37	0.7737	0.3035	18.018	10.75	29.00
38	0.7913	0.3341	21.582	11.02	21.00
39	0.8258	0.3267	20.79	11.16	28.00
40	0.8967	0.3335	15.444	10.05	18.00
41	0.8575	0.4014	22.968	2	250.00
42	0.7495	0.4014	26.334	2.03	315.00
43	0.8035	0.495	26.532	1.98	283.00
44	0.6955	0.495	28.908	2	336.00
45	0.7495	0.5885	27.522	1.96	305.00
46	0.6415	0.5885	28.512	1.98	380.00
47	0.6955	0.682	25.938	1.9	306.00
48	0.5875	0.682	25.542	1.94	390.00
49	0.6415	0.7756	22.176	1.94	245.00
50	0.6023	0.8435	19.008	2.1	185.00
51	0.5335	0.8832	18.216	2.11	210.00
52	0.4647	0.8435	20.196	2.09	276.00
53	0.505	0.7848	17.028	1.94	834.00
54	0.5335	0.8056	14.454	10.73	36.00
55	0.562	0.7848	15.048	11.06	25.00
56	0.5511	0.7513	19.8	3.16	387.00
57	0.5159	0.7513	20.592	1.86	744.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	45.936	1.33	201.00
2	0.2391	0.2144	45.936	1.3	176.00
3	0.1703	0.3335	46.134	1.29	152.00
4	0.2095	0.4014	44.748	1.27	169.00
5	0.2412	0.328	46.134	1.19	138.00
6	0.2757	0.3353	46.134	1.18	159.00
7	0.2933	0.3048	46.134	1.11	127.00
8	0.2697	0.2786	46.134	1.09	116.00
9	0.2375	0.2929	45.936	1.06	116.00
10	0.3175	0.2144	45.144	1.13	184.00
11	0.4255	0.2144	41.778	1.21	236.00
12	0.3715	0.3079	43.362	1.14	138.00
13	0.3175	0.4014	43.164	1.12	134.00
14	0.2635	0.495	41.58	1.1	241.00
15	0.3175	0.5885	37.62	1.16	219.00
16	0.3715	0.495	39.6	1.13	206.00
17	0.4255	0.4014	40.392	1.1	169.00
18	0.4795	0.3079	39.798	1.16	203.00
19	0.5335	0.2144	38.412	1.21	225.00
20	0.6415	0.2144	33.858	1.33	266.00
21	0.5875	0.3079	36.036	1.28	144.00
22	0.5335	0.4014	37.224	1.24	201.00
23	0.4795	0.495	37.224	1.24	211.00
24	0.4255	0.5885	35.64	1.24	201.00
25	0.3715	0.682	33.66	1.32	240.00
26	0.4255	0.7756	28.116	1.48	331.00
27	0.4795	0.682	30.69	1.35	293.00
28	0.5335	0.5885	33.462	1.35	370.00
29	0.5875	0.495	34.65	1.35	283.00
30	0.6415	0.4014	33.858	1.36	294.00
31	0.6955	0.3079	31.086	1.33	234.00
32	0.7495	0.2144	28.116	1.61	231.00
33	0.8279	0.2144	22.968	1.95	117.00
34	0.8967	0.2541	20.196	4.57	202.00
35	0.8295	0.2917	21.186	7.38	68.00
36	0.7973	0.2773	15.84	10.56	12.00

37	0.7737	0.3035	21.978	10.88	22.00
38	0.7913	0.3341	24.948	2.4	411.00
39	0.8258	0.3267	24.354	11.01	94.00
40	0.8967	0.3335	16.632	10.97	58.00
41	0.8575	0.4014	25.344	2.23	245.00
42	0.7495	0.4014	29.502	1.93	77.33
43	0.8035	0.495	29.7	2.21	348.00
44	0.6955	0.495	32.076	1.89	408.00
45	0.7495	0.5885	30.888	1.93	265.00
46	0.6415	0.5885	31.878	1.85	332.00
47	0.6955	0.682	29.7	1.89	417.00
48	0.5875	0.682	29.304	1.72	397.00
49	0.6415	0.7756	26.136	2.14	191.00
50	0.6023	0.8435	22.77	5.4	3.00
51	0.5335	0.8832	22.176	2.38	6.00
52	0.4647	0.8435	24.156	2.69	66.00
53	0.505	0.7848	22.77	5.01	279.00
54	0.5335	0.8056	19.206	10.93	27.00
55	0.562	0.7848	20.394	10.65	26.00
56	0.5511	0.7513	25.344	1.92	295.00
57	0.5159	0.7513	25.146	1.63	843.00

MUESTRA	COORDENADAS		VOLTAJE	pH	[Cu] mg/L
	X	Y			
1	0.1703	0.2541	45.936	1.15	163.00
2	0.2391	0.2144	45.936	1.01	141.00
3	0.1703	0.3335	46.134	0.99	160.00
4	0.2095	0.4014	45.144	0.93	197.00
5	0.2412	0.328	46.134	0.84	157.00
6	0.2757	0.3353	46.134	0.75	117.00
7	0.2933	0.3048	46.134	0.77	126.00
8	0.2697	0.2786	46.134	0.78	133.00
9	0.2375	0.2929	46.134	0.75	144.00
10	0.3175	0.2144	45.342	0.81	190.00
11	0.4255	0.2144	42.57	0.89	224.00
12	0.3715	0.3079	43.758	0.86	117.00
13	0.3175	0.4014	43.758	1.06	221.00
14	0.2635	0.495	42.174	1.06	194.00
15	0.3175	0.5885	38.808	1.13	161.00
16	0.3715	0.495	40.59	1.09	130.00
17	0.4255	0.4014	41.382	1.06	117.00
18	0.4795	0.3079	40.788	1.08	221.00
19	0.5335	0.2144	39.6	1.17	194.00
20	0.6415	0.2144	36.036	1.29	161.00
21	0.5875	0.3079	37.62	1.21	145.00
22	0.5335	0.4014	38.61	1.18	191.00
23	0.4795	0.495	38.412	1.15	206.00
24	0.4255	0.5885	37.026	1.17	181.00
25	0.3715	0.682	35.64	1.33	282.00
26	0.4255	0.7756	31.68	1.45	302.00
27	0.4795	0.682	33.264	1.37	221.00
28	0.5335	0.5885	35.244	1.39	220.00
29	0.5875	0.495	36.234	1.39	241.00
30	0.6415	0.4014	35.64	1.37	199.00
31	0.6955	0.3079	33.858	1.38	225.00
32	0.7495	0.2144	32.274	1.62	275.00
33	0.8279	0.2144	27.918	2.14	261.00
34	0.8967	0.2541	23.76	2.46	56.00
35	0.8295	0.2917	23.958	2.79	8.00
36	0.7973	0.2773	10.494	10.41	6.00

37	0.7737	0.3035	27.324	10.74	27.00
38	0.7913	0.3341	29.898	1.85	277.00
39	0.8258	0.3267	29.106	10.56	50.00
40	0.8967	0.3335	20.592	11.04	54.00
41	0.8575	0.4014	29.7	2.99	21.00
42	0.7495	0.4014	32.472	1.9	245.00
43	0.8035	0.495	32.868	2.05	345.00
44	0.6955	0.495	34.254	1.82	409.00
45	0.7495	0.5885	33.66	2.02	304.00
46	0.6415	0.5885	34.254	1.77	358.00
47	0.6955	0.682	32.868	1.96	335.00
48	0.5875	0.682	32.274	1.77	312.00
49	0.6415	0.7756	30.294	1.87	105.00
50	0.6023	0.8435	26.334	7.67	10.00
51	0.5335	0.8832	25.938	4.95	3.00
52	0.4647	0.8435	28.314	4.68	5.00
53	0.505	0.7848	26.928	2.16	368.00
54	0.5335	0.8056	25.146	11.03	37.00
55	0.562	0.7848	25.938	10.92	36.00
56	0.5511	0.7513	29.106	1.65	195.00
57	0.5159	0.7513	28.512	1.52	508.00

APÉNDICE C:

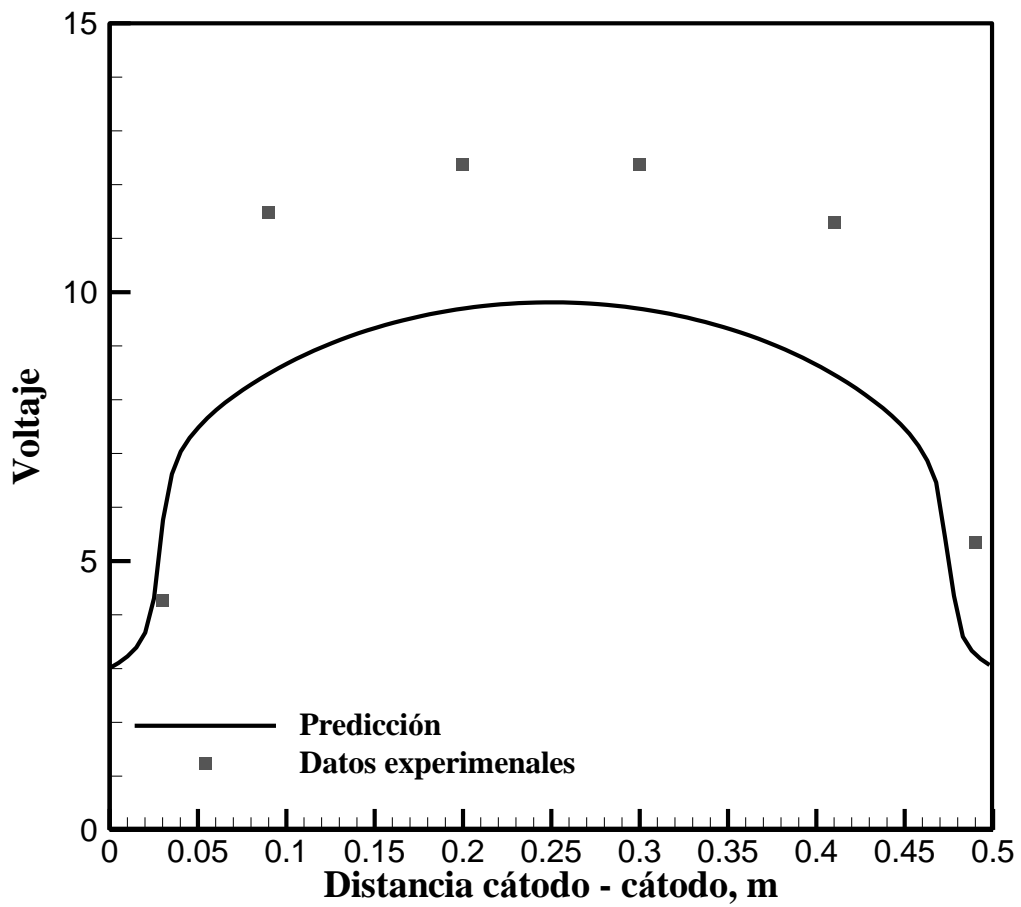


Figura C1. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100mg/L, voltaje de 20V, al término de 96 horas.

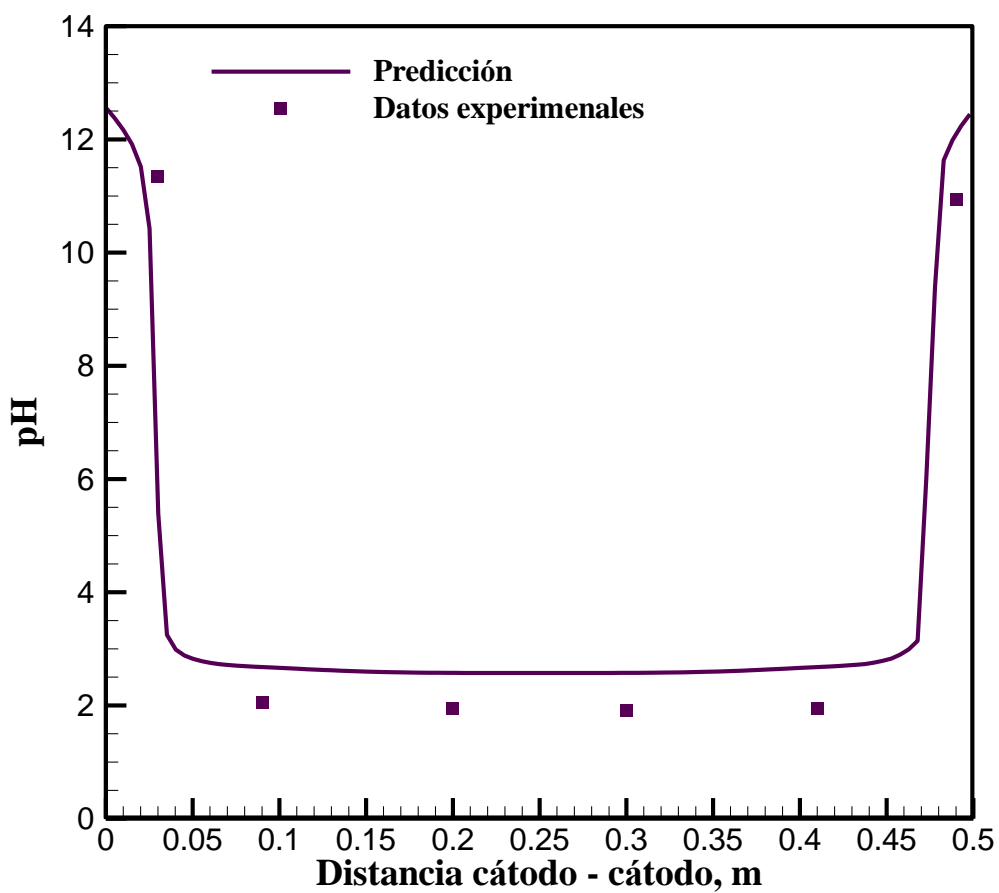


Figura C2. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100mg/L, y voltaje de 20V al término de 96 horas.

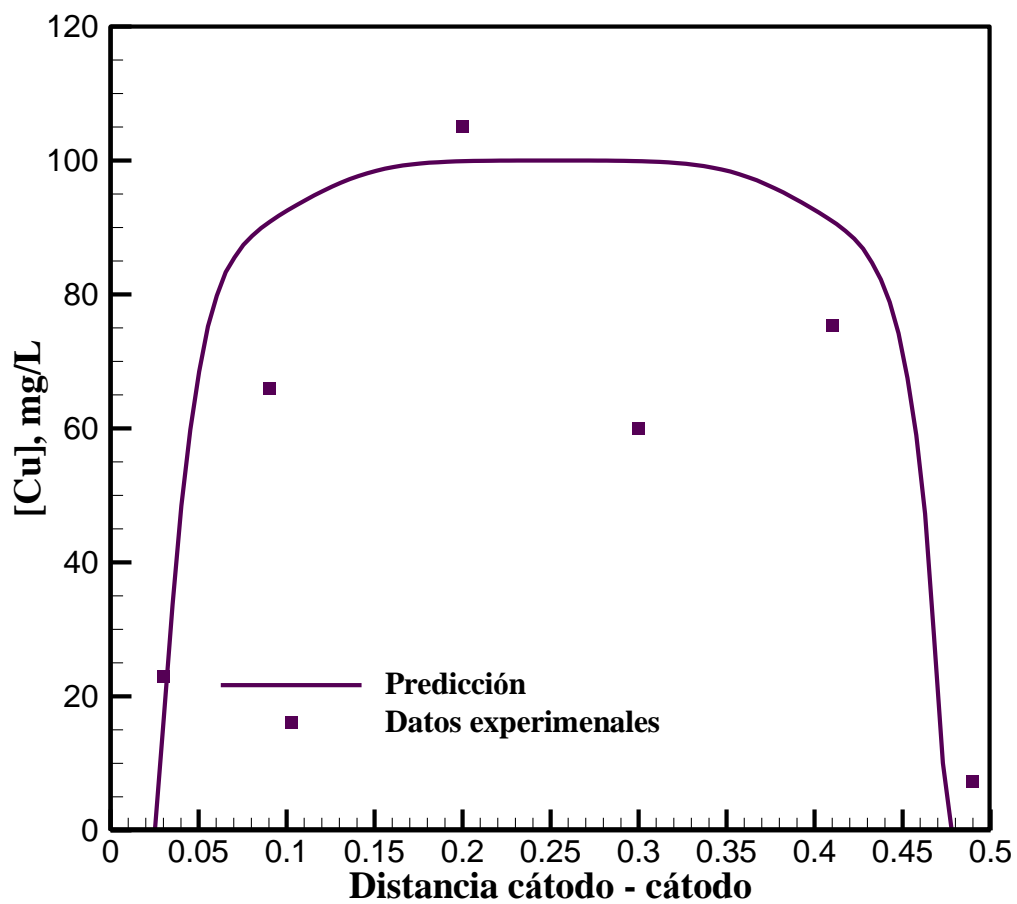


Figura C3. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 100mg/L, y voltaje de 20V al término de 96 horas.

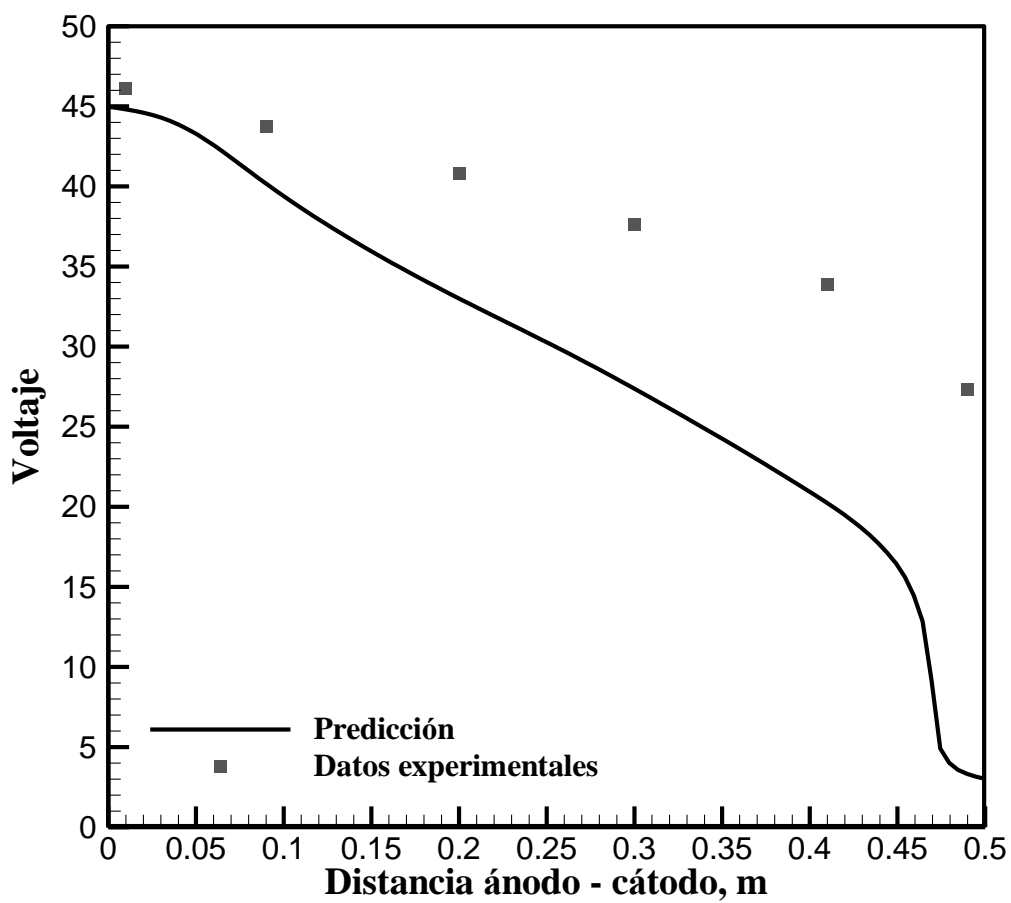


Figura C4. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltaje de 50V al término de 96 horas.

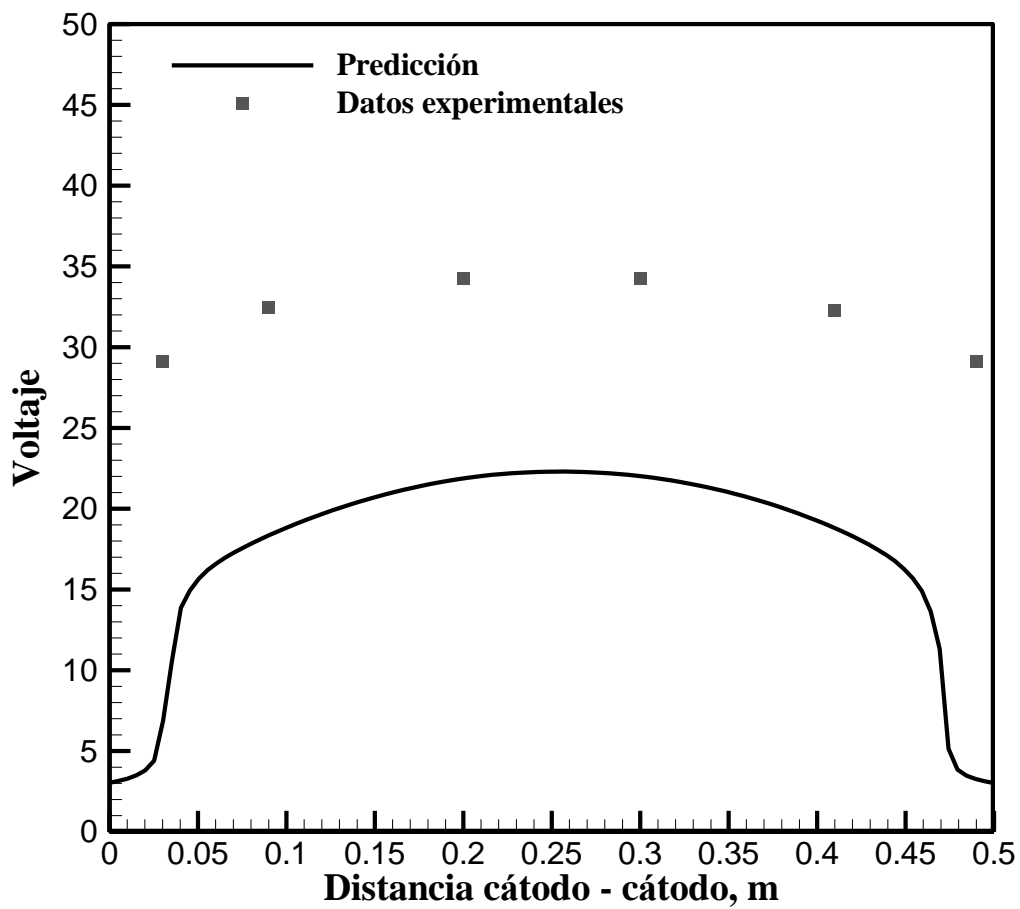


Figura C5. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de voltaje, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltaje de 50V al término de 96 horas.

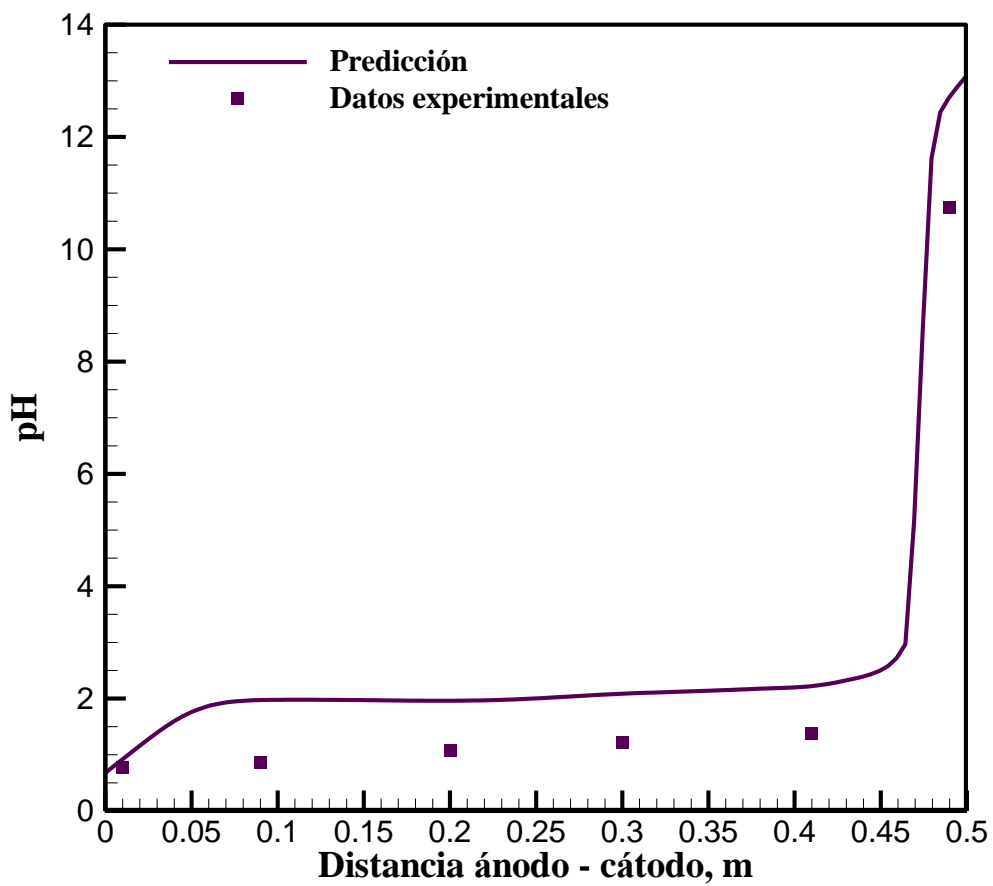


Figura C6. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltaje de 50V al término de 96 horas.

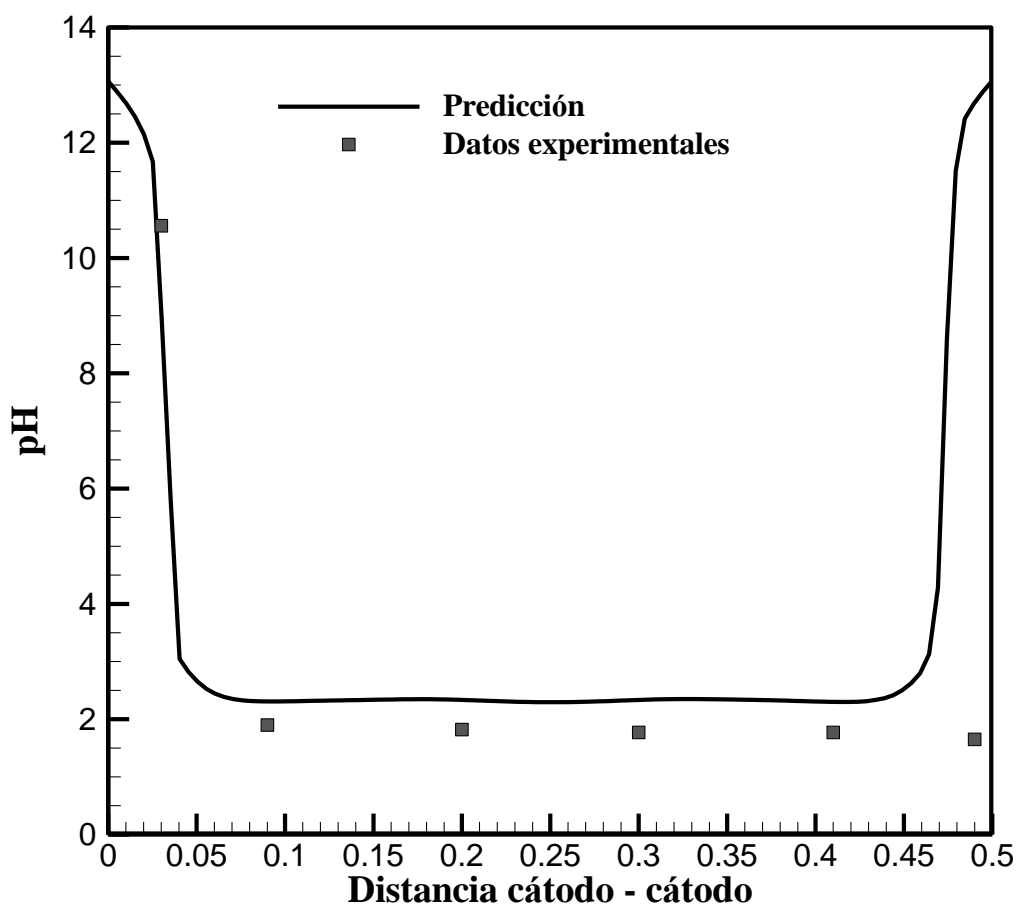


Figura C7. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltaje de 50V al término de 96 horas.

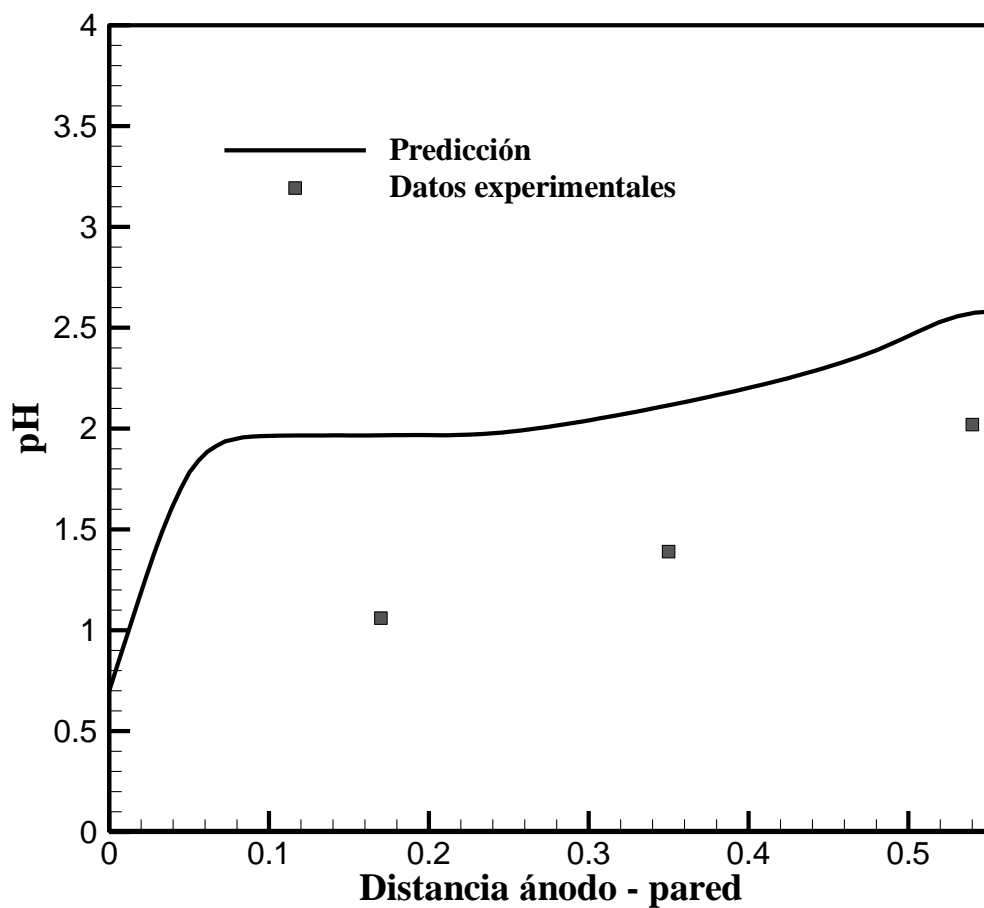


Figura C8. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de pH, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, voltaje de 50V al término de 96 horas.

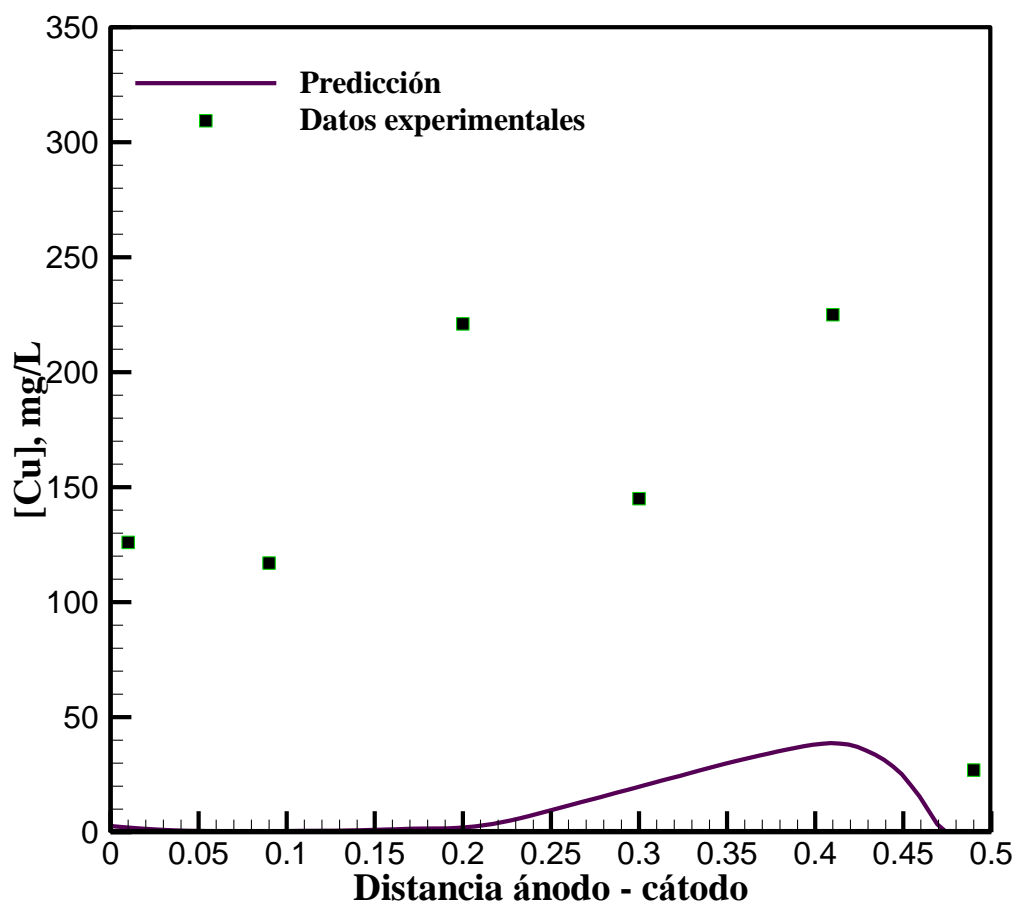


Figura C9. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y uno de los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltaje de 50V al término de 96 horas.

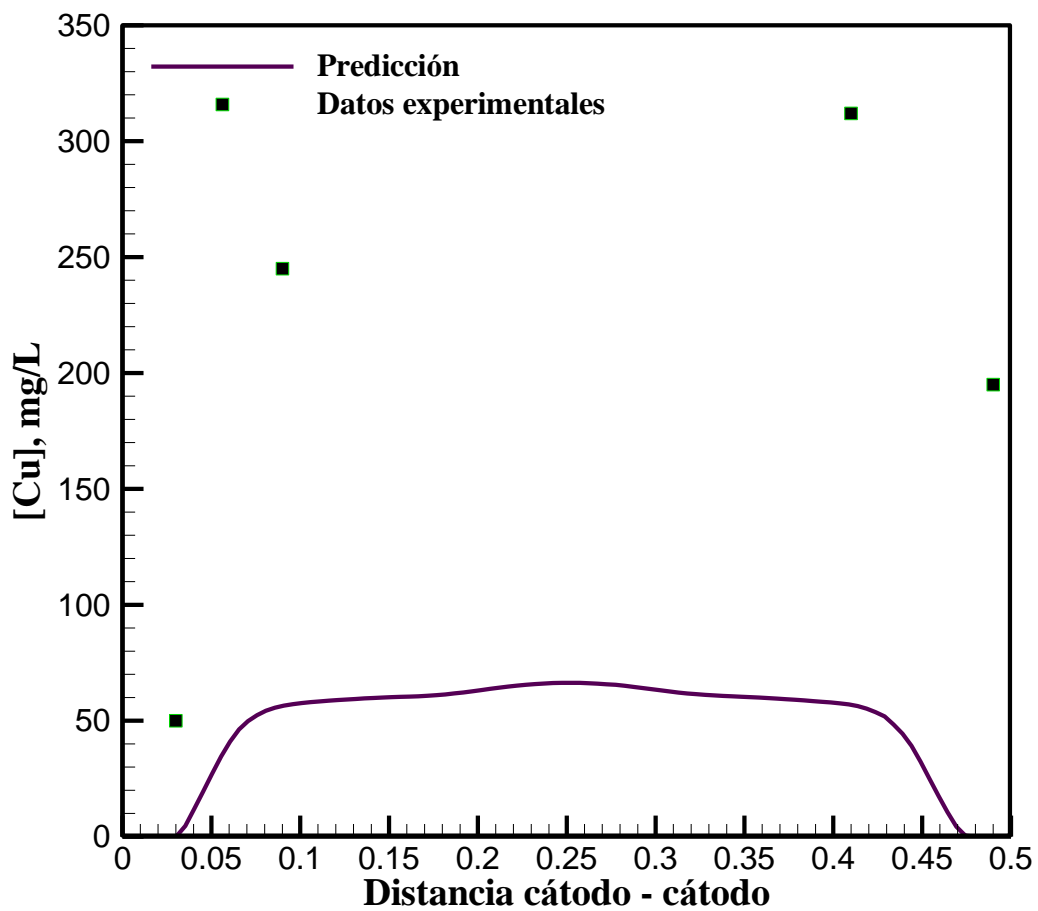


Figura C10. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre los cátodos, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, y voltajes de 50V al término de 96 horas.

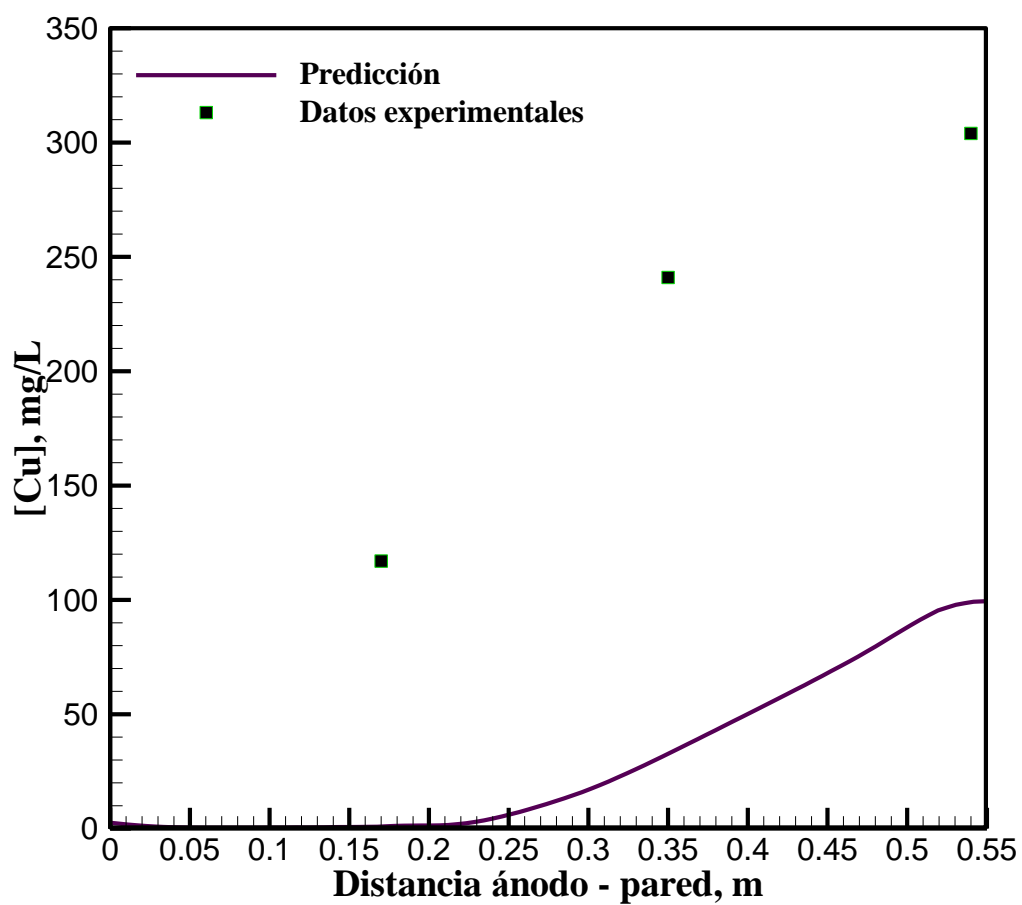


Figura C11. Comparación entre los resultados del modelo matemático y los datos experimentales de Cu total en solución, a lo largo de una línea de extracción entre el ánodo y la frontera del dominio computacional o pared opuesta de la celda, en base a una concentración inicial de Cu total en la solución de 300mg/L, voltaje de 50V al término de 96 horas.